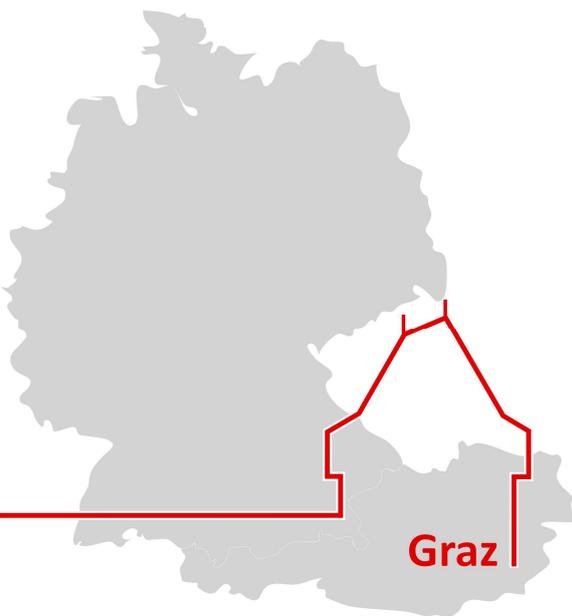




8th Conference of IBPSA Germany and Austria

PROCEEDINGS



BauSIM2020

23-25 September



BauSIM2020

8th Conference of IBPSA Germany and Austria
23-25 September 2020, Graz University of Technology, Austria

Proceedings

M. Monsberger, C. J. Hopfe, M. Krüger, A. Passer (Editors)

Institute of Building Construction | Institut für Hochbau
Graz University of Technology

Imprint

Editors:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Monsberger
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Christina J. Hopfe
Univ.-Prof. Dipl.-Wirtsch.Ing. Dr.-Ing. Markus Krüger
Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alexander Passer, MSc

Editing and Layout:

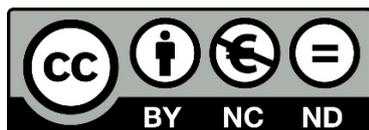
Dipl. Ing. Anna Karner
DDipl. Ing. Petra Fortmüller

Institute of Building Construction | Institut für Hochbau
Graz University of Technology
Lessingstraße 25/III
8010 Graz
Austria

E-Mail: michael.monsberger@tugraz.at
Web: www.ihb.tugraz.at

© Verlag der Technischen Universität Graz, 2020
www.tugraz-verlag.at

ISBN e-book 978-3-85125-786-1
DOI 10.3217/978-3-85125-786-1



This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International Licence.
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Preface

The Austro- German Chapter of the International Building Performance Simulation Association (IBPSA) has run its biennial conference since 2006. Graz University of Technology (TU Graz) is proud to be hosting the 8th BauSIM conference from 23rd – 25th September 2020, the second such conference to be organized by an Austrian institution. Every year brings a new adventure and challenge; and sadly 2020 brought a global pandemic that has resulted in much human suffering and has indelibly changed the working and social lives of many of us. As the organizing team of the BauSIM, at the peak of the first wave of this crises, we faced the daunting decision of whether to postpone or to cancel the conference entirely. We did not know whether to err on the side of optimism and hope for the best by organizing an in-person event, or whether a hybrid model or even a virtual conference was more realistic. In the midst of the current second wave that is building across Europe, we are relieved to have opted for the online format and are pleased to be hosting the first ever virtual BauSIM conference.

The term BauSIM is a composite of the German word for building “Bau” and a contraction of the word simulation. In these times of climate crisis and a pandemic, the quality of the built environment comes to the fore. Buildings are a major greenhouse gas contributor and therefore a key factor towards mitigating climate change and biodiversity loss. But this meta-role comes in addition to their more immediate function in terms of issues pertaining to indoor air quality, thermal, acoustical and visual comfort, productivity, and the ability to regulate a buildings' environmental systems. The current pandemic shows more than ever the mutual importance of high quality and high performance building design in support of the health and wellbeing of people and communities. With greater awareness of accelerating global change, we realise that there is still much to do in order to tackle all of the challenges before us. More so when we consider the time-horizon of these challenges in the context of a predominantly static building stock.

The nature of this years' conference has forced us to adapt the format and we have made use of pre-recorded video presentations which will be aired during live interactive sessions throughout the conference. We are delighted to announce two keynote speakers this year, Dr. Ruchi Choudhary from the University of Cambridge, who will deliver a talk on “Digital Twins of the Built Environment” and Dr. Steffen Robbi, who will present “The role of R&D within the digital transformation of the building industry”, as well as Dr. Sven Moosberger from EQUA who will give a provocation talk, gleefully (we hope) entitled “time to despair?”.

We also have in store a roundtable discussion with leading experts in the field of building performance simulation on the topic of “challenges and future endeavours”. Participants for this discussion are Prof. Joe A. Clarke (Professor Emeritus, University of Strathclyde, FIBPSA), Prof. John Grunewald (Professor and Chair of Building Physics, TU Dresden), Dr. Per Sahlin (CEO EQUA Simulation AB, FIBPSA), Dr. Michael Wetter (Deputy Leader Simulation Research Group, Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), FIBPSA), and Mr. Andrew Corney (Product Manager at Trimble - SketchUp and Sefaira, UK; FIBPSA).

This year we received 133 abstracts, which following the abstract review process resulted in 97 full papers being submitted. Of the 80 paper submissions finally accepted, 43% were submitted in German and 57% in English. Hence, this is likely to be the first BauSIM conference, where we will witness more contributions being delivered in English than in German.

In total we have received contributions and registrations from participants from 10 countries (Sweden, Germany, Albania, Austria, Italy, Hungary, Turkey, UK, Switzerland and the US). All of the papers submitted underwent a double-blind peer review process courtesy of our review panel, which comprised of international experts in the domain of building simulation. The standard of the paper contributions as well as the hard work of our scientific committee shine through in our conference proceedings and demonstrate the high quality of research within the IBPSA community, where 9 of the accepted papers will be selected for publication in a special edition of the *Bauphysik* journal (Wilhelm Ernst & Sohn publishers).

In terms of the subject themes BauSIM 2020 shows the following topical distribution: “tools for building and district simulation” (ca. 30%), “optimization of operation strategy” (ca. 20%), “comfort (thermal, visual, auditory, physiology)” (ca. 20%), “BIM based simulation and tools” (10%), “regenerative, decentralized energy systems” (ca. 5%), “life cycle oriented modelling and simulation of buildings and urban systems” (ca. 5%).

We would like to thank our colleagues at TU Graz without whose sustained efforts this conference would not have been possible. We extend our warmest thanks to our review panel, our scientific conference committee, our session chairs, as well as IBPSA World and SimAUD. A special thank-you goes out to our platinum sponsor EQUA, as well as for the support we have received from the Ministry for Climate Protection, Environment, Energy, Mobility, Innovation and Technology, Land Steiermark, and GreenTech Cluster. And finally we extend our thanks to you, our participants who are at the heart of this conference.

Thank you all for making BauSIM 2020 an event to be proud of at this challenging time.

Michael Monsberger, Christina J. Hopfe, Markus Krüger & Alexander Passer
Graz 2020

Platinum Sponsor

EQUA.

SIMULATION TECHNOLOGY GROUP

Supported by

-  **Bundesministerium**
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie



Partners



ibpsa

Germany and Austria



B

Barnaby , Charles	Independent consultant
Bauer , Martin	HS Augsburg
Bednar , Thomas	TU Wien
Biberacher , Markus	Research Studios Austria Forschungsgesellschaft mbH
Brembilla , Eleonora	Loughborough University

C

Corrado , Vincenzo	Politecnico de Torino
Crawley , Dru	Bentley Systems

D

de Wilde , Pieter	University of Plymouth
Dentel , Arno	TH Nürnberg Georg Simon Ohm

F

Felsmann , Clemens	TU Dresden
Ferk , Heinz	TU Graz

G

Gasparella , Andrea	Freie Universität Bozen
Gölles , Markus	BIOENERGY 2020+
Gratzl , Markus	FH Salzburg
Grunewald , John	TU Dresden

H

Haase , Matthias	SINTEF
Häfele , Karl-Heinz	KIT Karlsruhe
Hauer , Stefan	Austrian Institute of Technology
Heimrath , Richard	TU Graz
Herkel , Sebastian	Fraunhofer ISE
Heschl , Christian	FH Burgenland
Hirschberg , Urs	TU Graz
Hoes , Pieter-Jan	Eindhoven University of Technology
Hoffmann , Sabine	TU Kaiserslautern
Höfker , Gerrit	Hochschule Bochum
Howard , Bianca	Loughborough University

K

Karasu , Arda	TU Berlin
Knissel , Jens	Universität Kassel
Koch , Andreas	Europäisches Institut für Energieforschung
Koenigsdorff , Roland	Hochschule Biberach
König , Reinhard	Bauhaus-Universität Weimar
Kriegel , Martin	TU Berlin

L

Loonen , Roel	Eindhoven University of Technology
----------------------	------------------------------------

M

Maas , Anton	Universität Kassel
Mach , Thomas	TU Graz
Madjidi , Madjid	Munich University of Applied Sciences
Mardaljevic , John	Loughborough University
McElroy , Lori	Building Research Establishment
McLeod , Robert	TU Graz

N

Nytsch-Geusen , Christoph	Universität der Künste Berlin
----------------------------------	-------------------------------

O

Ochs , Fabian	University of Innsbruck
----------------------	-------------------------

P

Petzold , Frank	TU München
------------------------	------------

R

Rojas , Gabriel	FH Salzburg
Rüdisser , Daniel	AEE – Institut für Nachhaltige Technologien

S

Schmitz , Hans Jürgen	Frankfurt University of Applied Sciences
Schulz-Nigmann , Wolfgang	TH Mittelhessen
Schulz , Matthias	TU Wien
Schweiger , Gerald	TU Graz
Schweigler , Christian	Hochschule München
Schweiker , Marcel	RWTH Aachen University
Sick , Friedrich	HTW Berlin
Smarsly , Kay	Bauhaus University Weimar
Stephan , Wolfram	TH Nürnberg
Streicher , Wolfgang	Universität Innsbruck
Struck , Christian	Saxion Hogeschool

V

van Treeck , Christoph	RWTH Aachen
Vering , Christian	RWTH Aachen
Völker , Conrad	Bauhaus-Universität Weimar
Voss , Karsten	Uni Wuppertal

W

Weismann , Stephan	ZAE Bayern
Weiß , Tobias	AEE INTEC
Wetter , Michael	LBNL
Willmann , Anja	Jade Hochschule

Z

Zucker , Gerhard	Austrian Institute of Technology
Zuo , Wangda	University of Colorado Boulder

Keynotes	15
THE ROLE OF R&D WITHIN THE DIGITAL TRANSFORMATION OF THE BUILDING INDUSTRY	15
S. Robbi	
DIGITAL TWINS OF THE BUILT ENVIRONMENT	17
R. Choudhary	
Provocation	18
TIME TO DESPAIR?	18
S. Moosberger	
I: Modeling of building physics on building and component level	19
SHOWING NEW CONCEPTS WITH THERMAL ACTIVATED PREFABRICATED FACADES FOR RETROFITTING RESIDENTIAL BUILDINGS	20
F. Hengel, T.Ramschak, M.Gumhalter, D. Venus	
ENERGY PERFORMANCE EVALUATION OF GREEN FACADES IN HIGH-RISE BUILDINGS	28
P. Bano, S. Dervishi	
MODELING OF SOLAR RADIATION TRANSMISSION THROUGH TRIPLE GLAZING BASED ONLY ON ON-SITE MEASUREMENTS	36
F. Veynandt, C. Heschl	
TRANSPARENT INSULATION MATERIALS IN BUILDING RETROFIT: POTENTIALS FOR TERRASSENHAUSSIEDLUNG GRAZ	44
A. Eberl	
VENTILATION PERFORMANCE AND ENERGY ASSESSMENT OF A HIGH-RISE RESIDENTIAL BUILDING - A CASE STUDY IN MALAYSIA	53
L. Elgheriani, B. Cody, K. Shavarebi	
II: Modellierung und Simulation auf Gebäude- und Bauteilebene	61
PERFORMANCEOPTIMIERUNG HYGROTHERMISCHER 3D-SIMULATIONEN DURCH PARAMETEROPTIMIERUNG ITERATIVER GLEICHUNGSSYSTEMLÖSER	62
A. Nicolai, U. Ruisinger	
EINFACHE BERECHNUNG DES NETZDIENLICHKEITSPOTENTIALS VON GEBÄUDEN - CASE STUDY AM BEISPIEL EINES LABORNEUBAUS	71
L. Frison, B. Köhler, P. Engelmann, S. Herkel	
ENTWICKLUNG VON QUALITÄTSSTANDARDS FÜR DIE ENERGETISCHE GEBÄUDE- UND ANLAGENSIMULATION ALS PLANUNGSWERKZEUG	79
A. Nouri, A. Nicolai, B. Krämer, S. Hirth, J. Agudelo, C. Seifert, A. Malhotra, M. Madjidi, J. Frisch, C. van Treeck	
SIMULATION UND ABGLEICH MIT MESSUNGEN VON KÜHLUNGSSZENARIEN MIT CFD UND DEM CLIMATE MODEL WITH STRATIFICATION IN IDA ICE	87
C. Blatt	
WÄRMETRANSPORT VIA INNENTÜREN & FENSTERLÜFTUNG AM BEISPIEL EINES EINFAMILIENHAUSES MIT EINZELRAUMFEUERUNG IN TRNSYS	95
O. Mercker, D. Büchner, P. Pärtsch	

III: HVAC systems and large scale seasonal thermal energy storage	103
COMPARISON OF STATIONARY AND TRANSIENT RANS MODELLING TO PREDICT THE SPATIAL VELOCITY FIELD OF A CEILING INTEGRATED FAN	104
O. Glahn, T. Voß, K. Voss, S. Schwickert	
SIMULATION-BASED DESIGN OPTIMIZATION OF LARGE-SCALE SEASONAL THERMAL ENERGY STORAGE IN RENEWABLE-BASED DISTRICT HEATING SYSTEMS	112
A. Dahash, F. Ochs, A. Tosatto	
INVESTIGATION OF PHOTOVOLTAIC-THERMAL (PVT) COLLECTOR FOR DIRECT COUPLING WITH HEAT PUMPS: HARDWARE IN THE LOOP (HIL) AND TRNSYS SIMULATIONS	120
B. Chhugani, M. Kirchner, M. Littwin, C. Lampe, F. Giovannetti, P. Pärtsch	
TRIPLE-CRITERIA EVALUATION OF HVAC SYSTEM PERFORMANCES WITH DYNAMIC BUILDING SIMULATION	128
N. Harmathy	
MODELLING AND SIMULATION OF INNOVATIVE DECENTRAL DOMESTIC HOT WATER SYSTEMS WITH HEAT PUMPS FOR MULTI-FAMILY BUILDINGS	135
F. Ochs, S. Breuss, E. Venturi, M. Magni, G. Dermentzis, S. Fisco	
IV: Betriebsoptimierung	143
ENTWICKLUNG UND IMPLEMENTIERUNG VON BETRIEBSFÜHRUNGSSTRATEGIEN IN EINEM PLUSENERGIEGEBÄUDE	144
C. Betzold, A. Dentel, S. Bordin	
SIMULATION VON LÜFTUNGSSYSTEMEN UND ENTWURF VERSCHIEDENER REGLER FÜR OPTIMIERTE LUFTQUALITÄT UND ENERGIIEFFIZIENZ	152
D. Aimer, M. Wirnsberger, H. Krause	
ENERGIIEFFIZIENZ DURCH BIG-DATA-ANALYSEN IN DER GEBÄUDEAUTOMATION	161
L. Lauss, J. Mehnert, J. Lebert, T. Auer, S. Plessner	
UNTERSUCHUNGEN ZU EINER NETZGEFÜHRTEN TAKTSTRATEGIE FÜR DIE BETONKERNTEMPERIERUNG EINER BÜROZONE	170
J. Schäuble, D. Bohne	
V: Modeling and simulation on urban scale	177
SYSTEMATIC RECOGNITION OF DATATYPES AND RESOLUTIONS FOR DEFINING THE DEPTH OF DISTRICT AND BUILDING LEVEL RETROFITS	178
A. Malhotra, S. Zuhair, J. Frisch, C. van Treeck	
COMPARISON OF DIFFERENT ENERGY DEMAND CALCULATION MODELS ON URBAN SCALE	186
H. Harter, F. Banhashemi, D. Kierdorf, M. Vollmer, W. Lang	
CITY ATB: CITYGML ANALYSIS TOOLBOX FOR ENERGY PERFORMANCE SIMULATIONS	194
A. Malhotra, S. Raming, J. Frisch, C. van Treeck	
MODEL-BASED URBAN PLANNING AS BASE OF URBAN PERFORMANCE SIMULATION	202
S. Ebertshäuser, P. von Both	

INVESTIGATION OF WIND FLOW PATTERNS IN DENSE URBAN ENVIRONMENT OF AN EQUATORIAL TROPICAL CITY: A CASE STUDY IN SINGAPORE	210
P. Pawar, D. Zhang, X. Wu, W. Lang	
VI: Modellierung und Simulation im Lebenszyklus von Gebäuden	218
DIE BEDEUTUNG VON ANLAGENTECHNIK FÜR DIE ÖKOBILANZ VON NICHTWOHNGBÄUDEN	219
ERGEBNISSE EINES NEUEN ANLAGENKONFIGURATORS	
D. Chuchra, R. di Bari, O. Jorgji, S. Albrecht	
AUSWIRKUNGEN KLIMATISCHER VERÄNDERUNGEN AUF DIE ÜBERHITZUNG VON GEBÄUDEN	227
M. Vukadinovic, C. Kempkes, A. Maas	
SIMULATIONSSZENARIOEN FÜR GEBÄUDEENERGIESIMULATION IN FRÜHEN PLANUNGSPHASEN	233
E. Eckstädt, A. Paepcke, A. Hentschel, A. Schneider, A. Nicolai, F. Schumann	
EVALUIERUNG DES EINFLUSSFAKTORS FENSTERLÜFTUNG IN DER NACHWEISFÜHRUNG SOMMERLICHER ÜBERWÄRMUNG IM WOHNBAU	241
A. Kraft, M. Gratzl, T. Reiter	
ÖKOBILANZ DES ELECTRONICS BASED SYSTEMS BUILDING AN DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT GRAZ	249
D. Maierhofer, E. Hoxha, A. Passer	
VII: Building operation and user behaviour	256
HIERARCHICAL MODEL PREDICTIVE CONTROL FOR COMPLEX BUILDING ENERGY SYSTEMS	257
M. Mork, A. Xhonneux, D. Müller	
PREDICTION OF WINDOW HANDLE STATE USING MACHINE LEARNING	265
M. Vollmer, M. Langer, F. Banihashemi, H. Harter, D. Kierdorf, W. Lang	
SIMULATION-BASED ANALYSES AND EVALUATION OF OPERATIONAL FAULTS IN BUILDING TECHNOLOGY	273
L. Lauss, T. Auer	
MOBILE APPLICATION FOR ACTIVE CONSUMER PARTICIPATION IN BUILDING ENERGY SYSTEMS	281
T. Schanz, K. Corcoran, T. Schwengler, L. Eckersdorfer, G. Schweiger	
VIII: Gebäudetechnik	289
ENTWICKLUNG EINES THERMOELEKTRISCHEN HEIZ- UND KÜHLSYSTEMS MIT HOHEM WIRKUNGSGRAD	290
T. Blum, S. Carrigan, D. Platzek, O. Kornadt	
EXPERIMENTELLE VALIDIERUNG VON SIMULATIONSMODELLEN AN EINEM HARDWARE-IN-THE-LOOP WÄRMEPUMPENPRÜFSTAND	299
S. Hummel, C. Betzold, K. Kandasamy, S. Bordin, G. Harhausen, A. Dentel	

ANWENDUNG VON METHODEN DES MASCHINELLEN LERNENS ZUR GANZHEITLICHEN RAUMREGELUNG	307
S. Kalmbach, W. Haase, W. Sobek	
POTENTIALE PROGNOSEBASIERTER EINSATZPLANUNG VON LUFTWÄRMEPUMPEN	315
S. Muschik, M. Ehrenwirth, T. Schrag	
MODELLIERUNG UND SIMULATION EINES METALLHYDRID-SPEICHERSYSTEMS ZUR ÜBERSAISONALEN WÄRMESPEICHERUNG	322
F. Inschlag, P. Klanatsky, C. Heschl	
IX: Light and shading	330
EXPLORING THE POTENTIAL OF DYNAMIC FACADE SYSTEMS: AN EXTERIOR SHADING SYSTEM VERSUS A SWITCHABLE WINDOW	331
A. Ganji Kheybari, S. Hoffmann	
ENERGY DEMAND REDUCTION DUE TO AN INTELLIGENT SHADING CONTROL STRATEGY	343
P. Klanatsky, H. Plank, C. Heschl	
REVIT2DALEC: A BIM2BEM COMBINED THERMAL AND DAY- AND ARTIFICIAL LIGHT ENERGY CALCULATION WITH DALEC USING THE MVD	351
J. Miller, F. Moser, J. P. Stumpf, R. Pfluger	
POTENTIAL ENERGY SAVING VIA DYNAMIC SHADING WITH ELECTROCHROMIC ELEMENTS IN ETFE WINDOWS	359
J. Cremers, H. Liebhart, D. Mirbach	
SIMULATION-ASSISTED DAYLIGHT PERFORMANCE EVALUATION OF AN EDUCATIONAL BUILDING IN A MEDITERRANEAN CLIMATE	368
S. Dervishi, F. Jemini	
X: Modellierung und Simulation auf Stadt- und Quartierebene	375
DREIDIMENSIONALE ERMITTLUNG DES THERMISCHEN KOMFORTS MIT DETAILLIERTER BERECHNUNG DER STRAHLUNGSTEMPERATUREN AUF BASIS VON MESSDATEN AUS DROHNENBEFLIEGUNGEN	376
D. Rüdisser, T. Weiss, L. Unger	
IMPULSE AUS DER GEBÄUDE- UND ANLAGENSIMULATION FÜR DIE BETRIEBSFÜHRUNG EINES KRAFT-WÄRME-KÄLTE-VERBUNDES	386
K. Walther, K. Voss	
LIKE-Q: ABSCHÄTZUNG DER CO₂-EMISSIONEN EINES NEUBAUQUARTIERS IN DER RAHMENPLANUNG	394
H. Roggenkamp, O. Rosebrock, T. Wilken	
BEWERTUNG DES WÄRMEBEDARFS DEUTSCHER BESTANDSWOHNGEBÄUDE MIT HILFE ÖRTLICH UND ZEITLICH AUFGELÖSTER GEBÄUDESIMULATIONEN	403
C. Vering, M. Mortimer, M. Nürnberg, D. Müller	
WOHNGBÄUDE ALS FLEXIBILITÄTSBAUSTEIN IM QUARTIERSVERBUND - ENTWICKLUNG EINES MODELLIERUNGSANSATZES	410
L. Bogischef, M. De-Borja-Torrejon, C. Hemmerle	

EIN ONLINE-TOOL ZUR ERPROBUNG BEZAHLBARER HANDLUNGSOPTIONEN FÜR ENERGIEEFFIZIENZ IM LÄNDLICHEN RAUM	417
U. Cämmerer-Seibel, G. Kiesel, C. Völker, D. Cebulla	
XI: Low carbon building simulation	425
IAQ SIMULATION - GOING BEYOND CO2 CONCENTRATION FOR THE ASSESSMENT OF TWO INNOVATIVE VENTILATION CONCEPTS	426
G. Rojas	
TRANSITION FROM INDOORS TO OUTDOORS - APPROACHES TO MODELLING THE EFFECT ON THE HUMAN THERMAL STATE	434
M. Rida, S. Hoffmann, A. Ganji Kheybari	
A NEW TOOLSET FOR A HOLISTIC EARLY STAGE PARAMETRIC LCA STUDY	442
C. von Raven, C. Frenzel	
SENSITIVITY OF INPUT DATA IN BUILDING HEATING ENERGY DEMAND SIMULATION	450
A. Geiger, A. Nichersu, V. Hagenmayer	
THE BENEFITS OF ENERGY REFURBISHMENT STRATEGIES OF AN ADAPTIVE REUSED INDUSTRIAL HERITAGE BUILDING	458
E. E. Yalcin, N. Türkmenoğlu Bayraktar, E. Kishali	
XII: Validierungsmethoden / Simulationswerkzeuge in der Ausbildung	467
ENTWICKLUNG UND VALIDIERUNG VON GREY-BOX-MODELLEN ZUR MODELLIERUNG DES THERMISCHEN VERHALTENS VON EINZELBÜROS IN EINEM NIEDRIGENERGIE-BÜROGEBÄUDE	468
S. Freund, G. Schmitz	
IMPLEMENTIERUNG UND VALIDIERUNG EINES ALGORITHMUS ZUR THERMISCHEN SIMULATION VON TRANSPARENTE BAUTEILEN	476
C. Conrad, J. Grunewald, H. Fechner	
ENTWICKLUNG EINES ONLINE-SIMULATIONSWERKZEUGS ZUR INTERAKTIVEN NUTZUNG VON MODELICA-BIBLIOTHEKEN ZUR ENERGETISCHEN GEBÄUDE-SIMULATION FÜR DEN EINSATZ IN DER LEHRE	484
C. Nytsch-Geusen, W. Kaul, D. Kreulitsch, J. Rädler	
LEHRKONZEPTE DER BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ÜR ARCHITEKTUR-STUDIERENDE	492
H. J. Schmitz	
XIII: BIM based planning tools and integration approaches	499
INTEGRATED REPRESENTATION OF BUILDING SERVICE SYSTEMS: TOPOLOGY EXTRACTION AND TUBES ONTOLOGY	500
N. Pauen, D. Schlütter, J. Siwiecki, J. Frisch, C. van Treeck	
METATGA: A CHANCE FOR BIM IN THE FIELD OF MEP	507
S. Hauer, J. Murschetz, A. Bres, A. Sporr, M. Schöny, M. Monsberger	
A HYBRID METHOD FOR AN INTEGRAL FUNCTION DESCRIPTION OF BUILDING SERVICES	513
M. Ihlenburg, T. Rist, G. A. Benndorf, N. Réhault	

DEVELOPMENT OF A CONCEPTUAL DATA MODEL FOR THE DIGITAL DESCRIPTION OF FAULTS IN THE BUILDING SYSTEMS´ OPERATION	520
P. Alfonso, T. Rist, T. Müller-Eping, N. Réhault, P. von Both	
IFC TO BUILDING ENERGY PERFORMANCE SIMULATION: A SYSTEMATIC REVIEW OF THE MAIN ADOPTED TOOLS AND APPROACHES	527
M. Elagiry, N. Charbel, P. Bourreau, E. Di Angelis, A. Costa	
ANALYSIS ON AUTOMATIC GENERATION OF BEPS MODELS FROM BIM MODEL	535
J. Karlapudi, K. Menzel	
A REVIEW ON COUNTRY SPECIFIC DATA AVAILABILITY AND ACQUISITION TECHNIQUES FOR CITY QUARTIER INFORMATION MODELLING FOR BUILDING ENERGY ANALYSIS	543
A. Malhotra, J. Bischof, J. Allan, J. O´Donnel, T. Schwengler, J. Benner, G. Schweiger	
A DECISION SUPPORT SYSTEM FOR BIM MANAGERS ON THE EXAMPLE OF THERMAL SIMULATION	550
A. Shadrina, A. Gutierrez, A. Sporr, B. Blank-Landeshammer, S. Fallman, G. Zucker, C. Ruhsam, A. Ferreiro Sistiaga, K. Kogler	
XIV: BIM basierte Planungswerkzeuge und Integrationsansätze	558
DIGITALE PLANUNG UND BIM IM BRANDSCHUTZ - MEHRWERT UND AKTUELLE HERAUSFORDERUNGEN	559
V. Langner, M. Siemon	
BIM UND VERGABERECHT - EINE (UN)ÜBERWINDBARE HÜRDE?	567
D. Deutschmann	
EINBINDUNG DER BAUPHYSIKALISCHEN FACHBEREICHE SCHALL-, FEUCHTE- UND BRANDSCHUTZ IN DEN BIM-PLANUNGSPROZESS	575
S. Wieder, M. Gratzl, T. Reiter	
ENTWICKLUNG EINER VIRTUAL REALITY-UMGEBUNG ZUR INTERAKTIVEN THERMISCHEN RAUMSIMULATION	583
C. Nytsch-Geusen, K. Mathur	
BIM-BASIERTER REDUCED ORDER ANSATZ FÜR THERMISCHE GEBÄUDESIMULATIONEN	591
D. Jansen, M. Nürnberg, D. Müller	
IMPLEMENTIERUNG VON KI-BASIERTEN REFERENZPROZESSEN FÜR DIE COMPUTERGESTÜTZTE OBJEKTERKENNUNG IM GEBÄUDE	599
M. Leonhardt, N. Pauen, L. Kirnats, J.-N. Joost, J. Frisch, C. van Treeck	
XV: Lifecycle-oriented modeling and usability	607
FACILITATING BUILDINGS´ LIFE CYCLE ASSESSMENT THROUGH FLEXIBLE LCA TOOLS	608
O. Jorgji, R. Di Bari, R. Horn, D. Chuchra	
CONCEPT FOR SOFT-LINKING A MULTI-ENERGY SYSTEM CO-PLANNING MODEL TO AN URBAN ENERGY SIMULATION PLATFORM	616
C. B. Heendeniya, S. Köhler, B. Schröter	
TOOL CHAIN FOR LCA-BASED INTEGRAL PLANNING SUPPORT IN THE CONTEXT OF SUSTAINABLE BUILDING ASSESSMENT	624
S. Ebertshäuser, P. von Both	

USABILITY EVALUATION OF A BUILDING SIMULATION WEB-BASED DESIGN GUIDE ON POTENTIAL USER GROUP	631
R. Jayapalan Nair, E. Brembilla, C. Hopfe, J. Mardaljevic	
XVI: Calibration of models and data driven techniques	639
CALIBRATION OF DOMESTIC HOT WATER SYSTEM SIMULATIONS WITH STOCHASTIC PROFILES	640
A. Bres	
ENERGY DEMAND PREDICTION FOR RESIDENTIAL BUILDINGS AT DIFFERENT CLIMATE CONDITIONS BASED ON DIFFERENT DATA-DRIVEN MODELS	647
O.K. İşeri, S. Akin, I. G. Dino	
BUILDING SIMULATIONS FOR CONTROL TUNING: ACCOUNTING FOR MODEL USEFULNESS IN CALIBRATION METRICS CHOICE	655
A. Bres, F. Amblard, S. Hauer	
BUILDING MODEL CALIBRATION METHODS FOR BUILDING OPERATION APPLICATIONS	663
F. Hengel, D. Jähnig, P. Nageler, R. Pertschy, T. Weiss	
Index of authors	671

The role of R&D within the digital transformation in the building industry

Dr.-Ing. Steffen Robbi (Innovationslabor „Digital findet Stadt“)

Compared to most other industries, the productivity in the construction and real estate sector has hardly increased over the past 20 years. This is mainly due to a slow introduction of digitisation measures. According to Roland Berger, the construction industry is at the bottom across all sectors when it comes to the level of digitalisation.

A study by PwC from 2018 also confirms: "The people surveyed rate the importance and impact of the digitalisation in the construction industry very highly. Building Information Modelling (BIM) will increase the cost and time efficiency as well as the quality of construction projects in the future. The majority of construction companies have now also recognised the urgency of digitalisation. However, concrete implementation measures are still awaited".

Although many technological innovations are emerging, the high degree of fragmentation and the large number of different companies involved prevent efficient and comprehensive digitalisation. Large companies in the construction industry as well as international corporations from outside the sector have long since recognised this trend and are developing their own solutions, which, however, take little account of the needs and potential of the numerous SMEs, which account for almost 90% of the companies in the sector in Austria.

The slow arrival of digitalisation is therefore primarily a "cultural" problem. Integral work across company, sector and construction phases is a prerequisite for digitalisation and BIM to work out their full potential. All stakeholders involved must communicate in a model-oriented manner, responsibilities must be reorganized and knowledge must be shared with one another.

After the last few years within a steady conversion process, after courageous small steps and initial pilot projects, the construction industry is now facing a major transformation. Internal analogue processes in communication, billing, data exchange, etc. have already been replaced by new digital tools and platforms. At this stage in particular Covid-19 has helped to change peoples minds and habits in the usage of digital communication platforms. IT problems that until recently seemed unsolvable were realized within a very short time. New flexible working environments and habits have already established themselves as a standard in many places.

In the next step of the transformation, we begin to gain comprehensive benefits from the application of digital models and tools. We establish automated, model based mass and quantity calculations, test digital procurement processes, establish open standards in order to enable the introduction of project-accompanying building simulations for quality assurance. We recognize the added value of a cross-phase collaboration and the consistency of data chains from planning to operation.

However, real efficiency advantages arise less from people being replaced by machines or analogue by digital processes. Significant change comes from new business models. In the construction industry, the greatest potential is seen in the use of operating data and in the (partial) automation of construction processes. However, disruption does not necessarily have to result in substitution, but can also lead to synergy and to hybrid business models in which analogue products and digital technologies are combined.

Role of Austrian research

In order to solve the upcoming change phases, not only new digital tools are needed, but a new type of collaboration. We need a powerful vision of what the construction industry of the future should look like. Understanding buildings as spaces for living and work is not just the task of architects and developers. It is important to understand the requirements of users and operators and to develop projects based on them.

Research and development play an essential role within this. R&D projects offer an excellent framework to try out new ideas or technologies and to win interesting companies as future customers or partners.

According to the BMK, research expenditures in the area of built environment (buildings and cities) sum up to around EUR 136 million over the past 20 years. In addition to 650 research projects, around 80 pilot buildings were

constructed in which innovative energy technologies and sustainable construction methods have been demonstrated. With R&D expenditures of only 0.4% based on gross domestic value, Austria only ranks 8th in Europe. Nevertheless, with targeted programs and great innovations, it has been possible to achieve high international recognition in the field of sustainable buildings. For example, the first passive houses in China were developed and implemented by Austrian offices.

Similar efforts must now be made in the field of digitalisation in order to keep Austrian companies internationally competitive and to increase the long-awaited productivity of the construction sector.

However, since the topic of digitalisation ranges from communication platforms to the use of artificial intelligence, from robotics on the construction site and connected sensors, to autonomous driving systems, drones and IoT in operation, a new approach is also required in research. A common vision must form the basis for developing an overarching strategy with defined use cases for digitalisation in order to be able to clearly show the benefits with the greatest added value.

With the help of so-called innovation laboratories, Austria-wide platforms were created, which represent a central point of contact for certain topics. For the digitalisation of the construction industry, the recently founded innovation laboratory Digital Findet Stadt offers a cross-phase platform on which new innovation projects are initiated. Starting with a common vision, ideas are developed towards marketable products and services by use of co-creative methods and tools. Promising research & innovation projects are supported with relevant resources, know-how and access to a comprehensive partner network, thus promoting cross-sector and cross-phase digitalisation - with open BIM as a central element.

Together with its partners, the innovation laboratory Digital Findet Stadt is working on the consistency of processes and data models in order to increase resource, energy and cost efficiency. Digitized processes are the basis for robust risk management and quality assurance across all phases of the life cycle.

An important indicator in the assessment of success will be whether it is possible to activate the "swarm intelligence" of the many SMEs and to stimulate a comprehensive build-up of skills so that Austria remains an innovative, export-oriented and internationally renowned business location for the construction industry.

Dr.-Ing. Steffen Robbi co-founded the innovation lab Digital Findet Stadt, platform for digital innovations in the construction and real estate industry. Previously, he was responsible for Digital Building Technologies as Business Manager and Senior Engineer at the AIT Austrian Institute of Technology. His first experiences in shaping an innovative business model that achieves rapid market growth with sustainable technologies, was at the German start-up and now internationally renowned company Cloud&Heat Technologies.

Digital Twins of the Built Environment

Dr Ruchi Choudhary (Research Group of Digital Twins of Built Environment at the Alan Turing Institute and University of Cambridge)

Dr Ruchi Choudhary is Reader of Architectural Engineering in the Engineering Department at University of Cambridge. She specializes in simulation methods for predicting energy demand of the built environment. She is leading the research group on Digital Twins of Built Environment at the Alan Turing Institute (2018-2021). At Cambridge, she leads the multi-disciplinary Energy Efficient Cities Initiative, initially funded by a Science & Innovation award at Cambridge. She is also co-investigator of the Cambridge Centre for Smart Infrastructure & Construction. Her research spans simulation-based methodologies for energy management of buildings; uncertainty quantification in building simulation models; and multi-disciplinary interactions influencing energy use in cities. She is leading projects on modelling underground heat and city-scale geothermal systems, urban farming, and end-use energy demand modelling. In 2019 she became fellow of the International Building Performance & Simulation Association (IBPSA). She is elected chair of IBPSA-England since 2018. She is on the editorial board of J. of Building Performance Simulation, BSER&T the CIBSE Journal, Sustainable Cities and Society, and ICE J. of Smart Infrastructure & Construction.

Time to Despair?

Dr. Sven Moosberger (EQUA Solutions AG)

Dr. Sven Moosberger is co-founder and co-CEO of EQUA Solutions AG Switzerland. In this role, he has accompanied building performance simulation in the German-speaking world over the past ten years on its way from research to both education and planning practice. His experience ranges from extensive validation studies, model development for product design, development and implementation of training courses to project management of real construction projects in the fields of both building physics, HVAC engineering and building automation. Today he works intensively on the application of building simulators during operation.

I: Modelling of building physics on building and component level

SHOWING NEW CONCEPTS WITH THERMAL ACTIVATED PREFABRICATED FAÇADES FOR RETROFITTING RESIDENTIAL BUILDINGS

F. Hengel¹, T. Ramschak¹, M. Gumhalter¹ und D. Venus¹

¹AEE - Institut für Nachhaltige Technologien, Gleisdorf, Austria

ABSTRACT

Upgrading the existing building stock is one of the main leavers to reduce the heating energy demand. Therefore, prefabricated thermally activated curtain façades offer the possibility to upgrade insulation and the heating system in one step whilst reducing the disturbance of residents during the renovation process.

In this paper the performance of such systems with a validated model in IDA ICE for room heating is examined. To compare, a sensitivity study is carried out with different concepts and wall types, as well as a diagramm for designing such systems is established. All simulations are assessed with the defined key figures.

INTRODUCTION

To increase the energy efficiency and to reduce the energy demand of buildings, retrofitting of existing residential buildings is of utmost importance.

There is a huge potential for highly efficient thermal refurbishments of multi-family buildings that would result in significant reductions of CO₂-emissions. However, the renovation rate for existing buildings has been declining for the past few years. In the case of comprehensive thermal renovations in Austria, it's lower 1% which is significantly lower than the goals set in the Austrian climate protection report (2% between 2020 – 2030). The current technical renovation standard as well as the renovation process have repeatedly proven to be insufficient in terms of providing the appropriate incentives. This applies not only to structural but also to HVAC refurbishments.

According to Fink et al. (2017) buildings constructed between the 1960s and 1980s account for the largest share of heating energy demand in Austria (cf. Figure 1 from IEE project TABULA from 2009 to 2012). The wall constructions are mainly based on concrete, vertical coring brick, or solid brick with either insufficient or no insulation installed.

Also, Höfler et al. (2006) shows in its investigations that in large-volume residential buildings from this era three different external wall construction are dominant:

- Concrete wall systems including wood wool panels with a total thickness of 25 - 30 cm
- Mantle block outer wall with a thickness of 25 cm or 30 cm, and
- Vertical coring brick wall with a thickness of 30 cm or 38 cm.

The u-values of these external wall constructions range between 0.7 W/(m² K) (30 cm concrete wall system) and 1.50 W/(m² K) (based on 25 cm vertical coring brick wall) according to Energieagentur Steiermark (2016). Top floor ceilings adjacent to an unheated attic typically exist of solid concrete and 3 cm of thermal insulation, resulting in a u-value of 1.00 W/m²K. Double-pane glazing with u-values between 2.5 W/m²K and 3.1 W/m²K is typical for Windows from this era. The heating of these buildings is often based on a fossil fuel fired boiler in combination with high-temperature radiators, and copper piping for energy distribution.

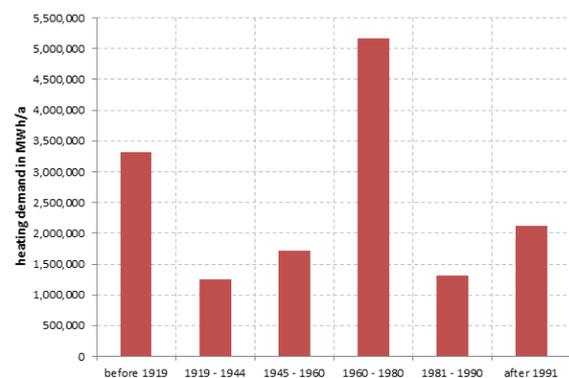


Figure 1: Total heating demand of all large-volume residential buildings per epoch according to IEE project TABULA, 2009 to 2012

Additionally to the necessary replacement of the heat source with more environmental friendly solutions the predicted lifespan of the copper piping is about to end after 50 years in operation. Replacing these heat distribution pipes can result in time-consuming construction works and high investment costs and also requires relocation measurers of the residents during the renovation phase, resulting in additional costs.

As reported by STATcube (2020) there are 3.863.262 dwellings in 2.046.712 buildings and 86 % of these buildings are residential buildings in Austria. The authors show that the largest share of dwelling units is part of residential buildings with 3 or more dwelling units in total. Following this, the focus of this research is pointed at large volume residential buildings in Austria constructed in the epoch between 1960 and 1980.

Derived from the challenges above, wall constructions using active heating layers between the structural part of the building and an outside insulation layer are quite promising. The typical appearance of those buildings with mostly flat surfaces encourages the installation of prefabricated curtain façades fitted with this active layer and holding the insulation. This technique also allows to retrofit a building without disturbing tenants on site with tedious construction work in and around the building over a long time period.

Challenging in this regard is the inconsistent contact situation between the active heating layer and the outside surface of the existing building. Also, the heat transfer rates are restricted as the thermal conductance of building materials like vertical coring bricks are quite low because of their air gaps in-between. However, to tackle this issue different concepts for active facades elements are investigated within this paper under consideration of comfort criteria. The paper also gives advices which concept can be used for which wall construction and discusses the flexibility potential.

To reach this aim a simulation model is established where a sample room is investigated. At the external wall a curtain façade with an active layer is implemented, and the heat transfer rates are determined for different concepts as well as for different construction of the external wall. To ensure proper simulation results a validation of the dynamic annual simulation model is done with a FEM based simulation model (higher spatial resolution). Additionally, the load shift potential is identified by applying a proper control strategy (using parametric runs for different setpoint temperatures of the observed rooms).

Based on the defined key figures the results are displayed in tables and diagrams and the compliance with comfort criteria is analyzed.

State of research

Regarding research work there are some publications concerning prefabricated façades. IEA ECBCS Annex 50 (2010) is a research project and dealt with renovation with prefabricated facade elements and integrated building services, such as solar thermal collectors, component heating of the outer walls and decentralized ventilation units. The façades also contained supply shafts for cable

routing, heating, domestic hot water and ventilation. In contrast to this paper no detailed concepts were worked out to improve the heat transfer rate and additionally no standard façades were defined and used, e.g. vertical coring brick, plaster and insulation.

Further projects, Doenig-Meisinger et al. (2007), Höfler (2012), Giwog (2020a), Giwog (2020b) and Alingsas Schweden (2013) primarily deal with prefabricated facade elements for renovation towards passive house standard. Partially they integrated some HVAC systems in the façade but as beforehand they do not investigate heat transfer rates for different concepts and wall constructions. Sonneseite (2015) investigates innovative external wall heating elements with capillary tube mats which are connected to a concrete façade, but also here no other wall constructions are observed as well as no other dissipation system concepts.

SIMULATION & MODELLING

Within this chapter the concepts and basic constructions for the investigations are introduced and discussed. This includes the boundary conditions, the experimental building and the validation environment. Lastly, the matrix for the case studies is defined.

Concepts and construction

As discussed in the introduction the renovation of buildings from the 1960's to 1980's holds two main challenges. Installing additional insulation to the existing walls to save energy and lower CO₂-emissions (cf. Figure 2) and replacing the outdated heating systems. As stated in the introduction a promising approach are pre-manufactured curtain façades including insulation and an active layer. The main task of such an active layer is to provide enough heat flux through the wall so that heating a room behind the wall is sufficiently possible. Therefore, four active layer design concepts from A to D (cf. Figure 3) are introduced and analyzed based on the performance. In concept C the active layer is exposed which means that the pipe is in-between the wall and the insulation and is surrounded by air in the gap. The other one, concept D, misses the air gap and the pipe is enclosed by insulation. In both of these concepts the PE-x pipes of the active layer are in direct contact to the existing wall. The other two concepts feature metal heat conduction plates (HCP) between the piping and the wall to increase the heat transfer rate to the room. In concept A the curtain façade is perfectly touching the existing wall, whereby concept B shows a small air gap in-between which is assumed to be 2 mm across the whole wall. This equidistant gap assumes a surface average of real existing construction with flatness and contract irregularities and therefore allows the use of 2D and

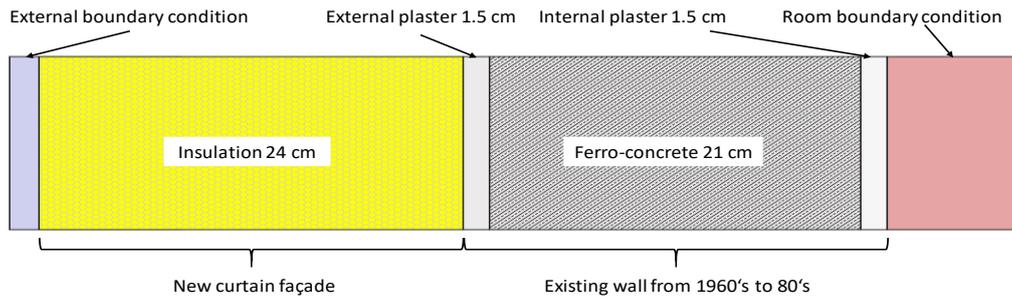


Figure 2: Basic wall construction with existing wall (e.g. ferro-concrete) and connected curtain façade without an active layer (active layers are displayed in Figure 3).

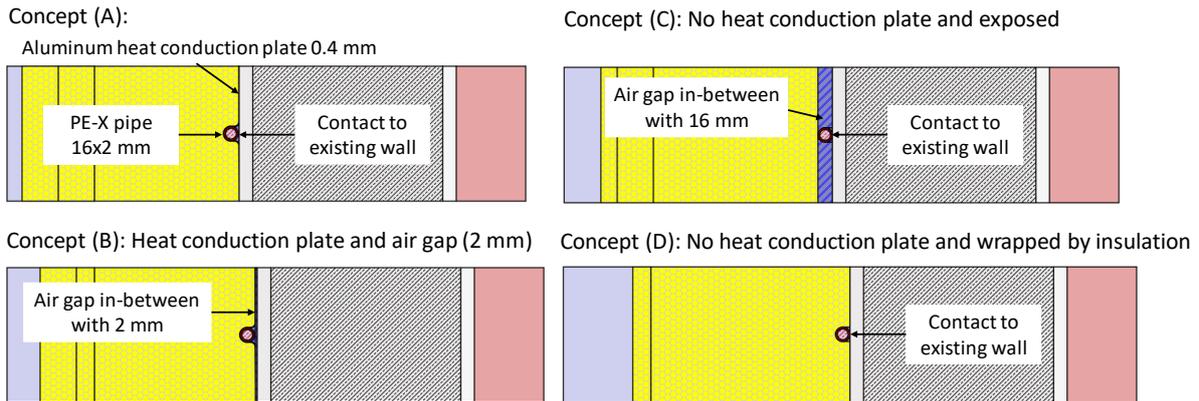


Figure 3: Four different design concepts for the active layer from A to D

1D model approaches. The thickness of the heat conduction plate is 0.4 mm ($\lambda = 237 \text{ W/m.K}$).

Table 1 shows the wall type variants (I to IV) and their material properties according to ÖNORM 8810-7 (2013) and Frei et al. (1994) which are used for the simulation. Furthermore, Table 2 shows the abovementioned total wall construction with the thicknesses of the different layers and their material properties. For the simulation the basic concept can be combined with different wall variants and dissipation system (concept A to D). The pipe is assumed as a PE-x pipe with an outer diameter of 16 mm and 2 mm wall thickness (16x2). The energy carrying fluid in all simulations is water.

Boundaries & Building

The modelled building/floor is derived from a real building in Graz, Austria. As there is no climate data available a climate data set of Graz-Thalerhof with latitude of 47.0° N and longitude of 15.43° E is chosen for the simulation.

Table 1: Wall type variants and their material properties

Wall type variant	Thickness in m	Thermal conductivity in W/(m.K)	Spec. heat capacity in J/(kg.K)	Density in kg/m ³
Ferro-concrete (I)	0.21	2.3	1000	2300
Vertical coring brick (II)	0.3	0.55	1000	1200
Solid brick (III)	0.34	0.8	936	1700
Concrete (IV)	0.25	0.4	1116	500

This can be justified as both locations are nearby. The elevation of the location is 340 m with a minimal dry-bulb temperature of -12.5 °C, and HDD_{20/12} of about 3100 K.d/a according to ASHRAE Fundamentals (2013).

Figure 4 shows the area where the building is located with the surrounding shades (left), and the floor consisting of three rooms, a corridor and a combined bathroom with WC (right).

Table 2: Total wall construction based on Figure 2

Layer external to internal	Thickness in m	Thermal conductivity in W/(m.K)	Spec. heat capacity in J/(kg.K)	Density in kg/m ³
Insulation	0.24	0.038	1030	90
Active layer	Concept A to D			
External plaster	0.15	0.87	1100	1800
Wall type	Variant I to IV			
Internal plaster	0.15	0.7	1000	1400

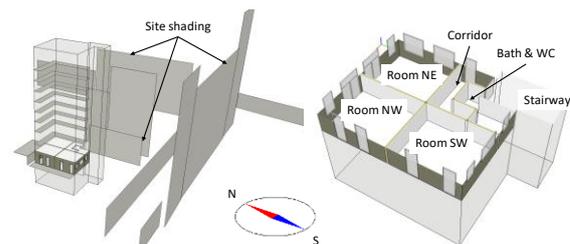


Figure 4: Whole area of the building (left) and the considered floor (right)

The rooms NE, NW, SW are utilized for two bedrooms each e.g. as student hostel as in the real building. Due to simplification the two bedrooms are merged to one thermal zone. Further details concerning net heating area, conditioned walls and windows are listed in Table 3.

The room height is 3.66 m based on the real building. The windows within the building are modeled based on the type UNITOP 0.7 filled with argon in-between. The g-value is set to 0.52 according to DIN EN 410 (2011) and the visible transmittance is 0.7. The total u-value of the window is calculated to be 0.74 W/(m².K).

For the ventilation a decentralized unit is implemented in each room with volume flow rates of 45 m³/h for the rooms and 75 m³/h for the bathroom and WC, respectively. The efficiency of the heat recovery is set to 90 % e.g. according to Meltem systems. The infiltration rate is assumed as 1 ACH (air change per hour) at 50 Pa pressure difference and depends on pressure coefficients for different wind directions. The latter are assumed as “semi-exposed” which means that the building is partially covered from the surrounding area (cf. Figure 4)

The boundary condition to the stairway is defined as Dirichlet boundary condition with 15 °C and to the other floors the Neumann boundary condition (zero gradient) is chosen.

The heating setpoint for the rooms as well as for the corridor is 22 °C, for bathroom & WC it is set to be 24 °C. The heating system is controlled with a PI controller. Concerning control strategy of the integrated shadings, they are drawn if solar radiations of 100 W/m² at the inside of the windows are reached and can be activated individually. Another requirement is that a window is opened – by the user – if the room temperature exceeds 26 °C to avoid miscalculation of the heating energy demand.

Table 3: Geometric details of the room and windows and heat load calculation (for wall type variant I, cf. Figure 2)

Name	Net heating area in m ²	Conditioned wall area in m ²	Area external window in m ²	Heating load in W
Room_NW	31.1	28.0	13.0	680
Room_NE	31.1	26.1	14.9	719
Room_SW	31	31.1	9.8	605
Bath & WC	10.2	8.1	1.4	523
Corridor	11.7	8.2	2.8	187

The remaining internal loads are around 200 kWh to 250 kWh, occupants excepted. Using the active layer for cooling purposes is thinkable but not object of this research. The simulation time is therefore set from 1st of Oct. to the 30th of April (heating only) and the time resolution is maximum 1 h, whereby the solver of IDA ICE can shorten these time steps whether vital for mathematical convergency or not.

The heat load calculation is done with the setpoints defined beforehand and the associated results are shown in the last column of Table 3. For the internal loads of the energy simulations the SIA 2024 (2015) standard is chosen. This standard defines the presence of the occupancies, the schedules, the devices and lights for different zones which is shown in Table 4. The highest energy consumption is allocated to lighting in the three thermal zones, respective to the three bedrooms with 4260 kWh.

Table 4: Internal loads for the rooms

Name	Number	Activity level	Mean power in W	Yearly total in kWh
Occupancy	6	1.2		
Devices	9.3		81	229
Lights	9.3		486	4260
Lights_Bath	1		29	255
Lights_Corr.	1.2		21	182

Model calibration & validation

The simulation tool which is used within this study is IDA ICE from EQUA Simulation AB. To calculate the heat transfer rate from the active layer to the room a 1-dimensional approach within the simulation tool is used whereby the heat transfer coefficient (HTC) has to be set. This value includes the heat transfer coefficient from the fluid to the slab/wall with respect to the total heated wall area (cf. equation (1)) and uses the nomenclature of the EN15377-1 (2009) standard.

$$\frac{1}{HTC} = R_w + R_r + R_x = R_t - R_z \quad (1)$$

Contrary to a floor heating system where the HTC value is nearly constant for all systems, the HTC value varies widely for the four active layer concepts described in Simulation & Modelling. The HTC is determined for all concepts and varying pipe distancing with an external software which is more related to heat transfer problems. HTflux – a 2-dimensional simulation tool based on FEM approach – is used to calculate the heat transfer rates for all active layer variants. A crosscheck procedure with heat flow results in IDA ICE leads to the identification of the needed HTC values.

The general suitability of IDA ICE for this class of simulation tasks is validated by comparing results for 1-dimensional heat flux in walls with results of identical HTflux simulations. This direct comparison which was conducted for static and dynamic cases is exemplary shown in Figure 5. In this Figure the used case is concept A with wall variant I (ferro-concrete) implemented as defined in Table 2. The validation uses a sequence of heating with an average fluid temperature of 35 °C followed by a cool down phase for which the mass flow rate is set to zero. The HTflux simulation uses about 5 million cells and 2D spatial resolution whereas the IDA ICE simulation utilizes a 1D 50-layer model.

Both use a time step of 10 min. The results show good agreement for the heating-up phase and slight deviation at the end of cool-down phase. This can probably be justified with the difference in the spatial resolution – 1D vs. 2D – which has a higher deviation as the wall temperature reaches towards room temperature, which is 22 °C in this case. Further steps of the validation show similar results which are not shown here.

As mentioned before, individual HTC values are calculated for the different concepts (A – D) and varying pipe distances. Latter ones have an impact on the heat transfer rate to the room and can only be represented by a higher or lower HTC value in IDA ICE because of the 1D spatial resolution. Table 5 shows these determined HTCs.

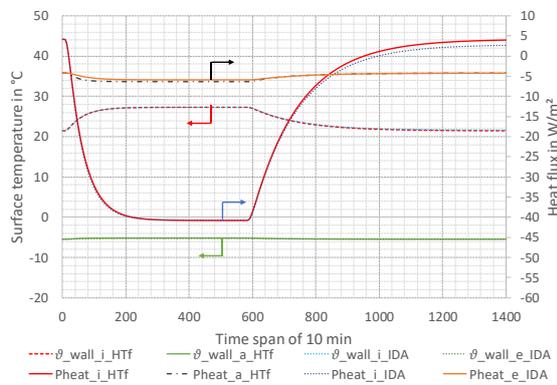


Figure 5: Validation of IDA ICE with HTflux for wall type variant I and concept A with a mean fluid temperature of 35 °C for heating purposes

With the applied HTC values in IDA ICE the heat flow or heat transfer rates shown in Table 6. The values are calculated with fixed room temperatures of 22 °C and ambient temperatures of -6 °C. This lower ambient temperature boundary was chosen as it is only rarely fallen short of over the whole heating period. Also, the design of the active layer in the façade and static simulations are based on this temperature difference.

Table 5: Calculated HTC values in $W/(m^2.K)$ for the different concepts and pipe distances

System/concept	Pipe distance in cm				
	10	15	20	25	50
HCP_dir (A)	31.6	19.8	13.5	10.4	4.3
HCP_air (B)	11.5	9.4	8.0	6.6	3.1
AL_exposed (C)	8.1	5.0	3.6	2.8	1.2
AL_wrapped (D)	7.0	4.4	3.2	2.5	1.1

Parametric runs

Table 7 shows the matrix for the parameter runs which are carried out. Herein the wall type variants, the insulation, the supply temperature to the active layer and HTC values are varied. For the latter the concept and pipe distances are combined to the HTC value which are varied from 1 to 30 and can be

compared with Table 5 which shows the representative concepts.

Table 6: Calculated heat flow to the room with the according HTC values in W/m^2

System	Pipe distance in cm				
	10	15	20	25	50
HCP_dir (A)	61	57	52	49	34
HCP_air (B)	50	47	45	41	28
AL_exposed (C)	45	37	31	26	13
AL_wrapped (D)	43	34	28	24	12

To investigate the flexibility potential, additionally the heating setpoint is increased from 22 °C to 26 °C to show if a proper control strategy can meet the comfort criteria by utilizing the thermal masses. For the mass flow rate a specific heating capacity of 38 W/m^2 and a fluid temperature drop between inlet and outlet of 5 K is assumed for the active layer.

Table 7: Matrix for the parameter runs which are investigated in the result chapter

Wall type variant	Insulation thickness in cm	Concept	Pipe distance in cm	Supply temp. active layer in °C
Ferro-concrete (I)	10	HCP_dir (A)	10	30
Vertical coring brick (II)	15	HCP_air (B)	15	35
Solid brick (III)	20	AL_exposed (C)	20	40
Concrete (IV)	24	AL_wrapped (D)	25	45

ANALYSIS AND DISCUSSION OF THE RESULTS

This chapter tries to draw a consensus between the results of two different analytical approaches. First and foremost, the dynamic simulations of the defined sample rooms during a complete heating season from Oct. to April, and secondly a static heat flux analyses of isolated wall segments.

Dynamic seasonal simulations

All seasonal parameter runs are carried out based on the assumptions made in the abovementioned chapter. To investigate the systems behavior two KPI's are defined in advance.

The following conclusions and figures are based on these indicators.

- The minimal room temperature of all rooms, which must not undercut 20 °C

$$\vartheta_{min,tot} = \min(\vartheta_{NE}, \vartheta_{NW}, \vartheta_{SW}, \vartheta_{bath\&WC}, \vartheta_{Corr})$$

- Heating energy demand (HED) of all rooms

$$HED = \sum_{i=1}^n Q_{room,i}$$

Figure 6 to the left shows on the ordinate the minimal room temperature of all rooms $\vartheta_{min,tot}$ during the parameter run, whereby on the abscissa the HTC value implemented in IDA ICE is shown. The datapoints represent different wall type variants and different supply temperatures as well as the

insulation thickness as the latter one has a high affect to the heat losses of the rooms. As the bathroom & WC cannot be heated properly a small radiator with 300 W is assumed parallel to the wall heating element. The right-hand side of Figure 6 shows the total heating energy demand of all rooms. For this first set of simulations a heating setpoint temperature of 22 °C was chosen for the PI-controller. The red horizontal line represents the comfort threshold for $\vartheta_{min,tot}$ at 20 °C. Obviously $\vartheta_{min,tot}$ is undercut often for the lower HTC values (e.g. HTC = 1 to HTC = 5), especially in combination with low insulation thicknesses (0.1 m to 0.15 m). However, using HTC of about 10 or higher leads to lower spreads amongst the data points for varying insulation thicknesses and wall type variants. Still, the lowest $\vartheta_{min,tot}$ is close to the threshold of 20 °C for the lower insulation thicknesses. The highest reached values for the room temperature are at about 21.5 °C even though the setpoint temperature is at 22 °C.

To answer whether these inconsistency origins from a lack of heating power or control deviation comes from, the same simulation runs are conducted with a setpoint of 26 °C. This can also show if there is some flexibility potential by using the high thermal mass of the wall. The results of these runs are demonstrated in figure 7. On the left-hand side $\vartheta_{min,tot}$ is shown and to the right the HED. Compared to Figure 6 it can be said that by

increasing the heating setpoint temperature of the room the number of times $\vartheta_{min,tot}$ is undercut can be reduced for HTC values of 1 and 5 and can be eliminated for higher HTC values.

Three main conclusions can be drawn out of this comparison.

- A simple PI controller is not able to properly control a system of this type due to the high thermal masses involved and the resulting long latencies. Using a proper control strategy and utilizing the thermal masses can handle low heat transfer coefficients of the active layer in a certain range.
- Façade integrated heating systems with HTCs lower than 5 might not provide enough heat flow to meet comfort criteria during heating season. This however, is highly dependent on the underlying setup.
- Higher achievable wall and room temperatures for well insulated, high HTC setups allow for more flexibility in operation as the thermal mass of the wall can be deployed as storage.

Comparing the HED in Figure 6 and Figure 7 reveals an increase for the 26 °C cases which is obvious as the room temperature is also higher compared to the standard case. More informative is a comparison of scenarios within the diagrams. As expected, the highest HED is obtained with the lowest insulation thickness of 0.1 m. Good improvements can be seen by using thicker insulation (0.15 m and 0.2 m) but

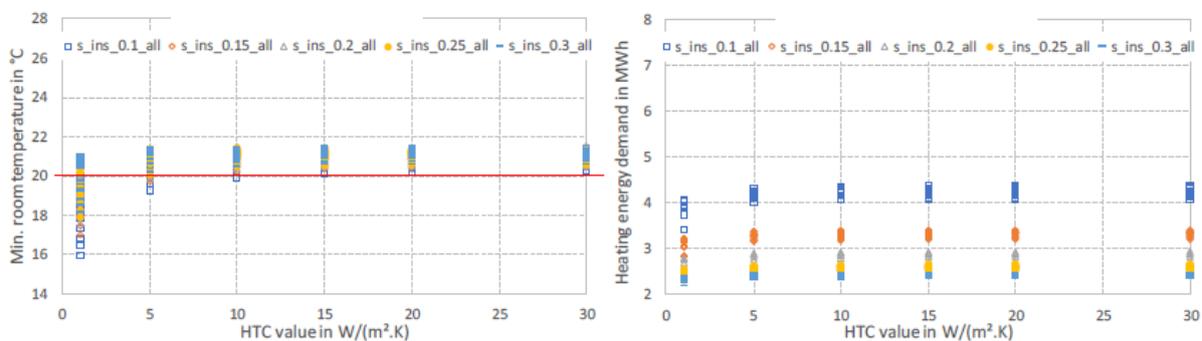


Figure 6: Analysis of the minimal room temperatures (left) and the heating energy demand of the floor (right) for all defined variants with a heating setpoint of 22 C

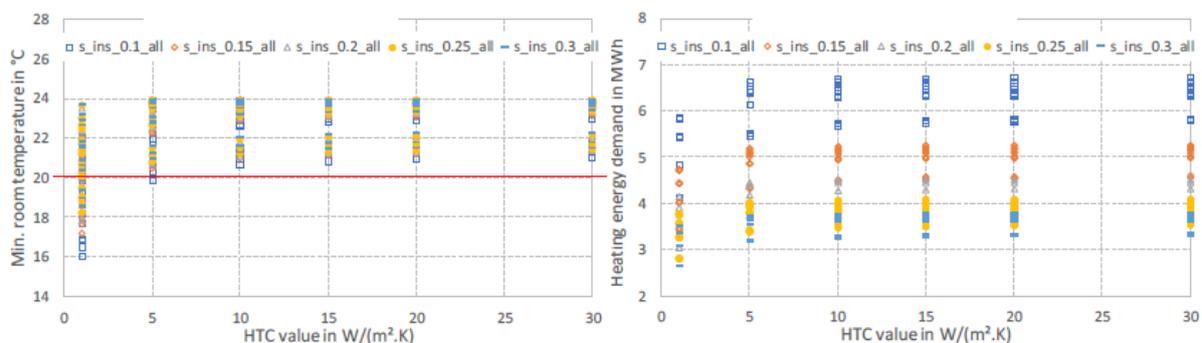


Figure 7: Analysis of the minimal room temperatures (left) and the heating energy demand of the floor (right) for all defined variants with a heating setpoint of 26 C

with decreasing gains for more than 0.25 m. Most interestingly the HTC value has just minor impacts on energy demand except for values lower than $HTC = 5$. In these cases, the HED is restricted by the inability of the active layer to emit more heat and not by the actual heat demand of the rooms. These limits on heat transfer rate are quantified in the following static heat flow considerations.

Static heat transfer and design guidelines

In addition to the previously introduced dynamic simulations a static assessment of heat transfer rates is conducted. Static heat fluxes were calculated with IDA ICE to find corresponding maximum heat transfer rates (HTR) to all cases from the matrix for parameter runs in Table 7. Founded on this data a design diagram for multifunctional façades with active layer (similar to the existing design diagrams for floor heating) was created. Exemplary for the wall type variant (I) ferro-concrete such a novelty diagram is pictured in Figure . The aim of this diagram is to provide easy to use design guidelines for planers and architects. A sample application is marked in orange color in the diagram and contains of the following steps:

1. Select the desired heat transfer rate per m^2 of wall area draw a horizontal line from there.
2. Choose a design over-temperature for your heating system and find the intersection of this temperature curve with the horizontal line from before. From there draw a vertical line reaching to the lower part of the diagram crossing the horizontal axis. Physically a u-value for the inner part of the wall including the HTC of the active layer and the boundary layer is set here.
3. Find the intersection of the vertical line with the curve related to your planned insulation standard (choice between passive house (PH) standard demanding for a total wall u-value of $0.15 W/(m^2.K)$ or the OIB standard demanding for a total wall u-value of $0.35 W/(m^2.K)$). From there draw a horizontal line to the left.
4. The intersection of the horizontal line with the lower vertical axis points to the HTC value which is the minimum required value for the system to work as intended. Based on this minimum value a suited system can be chosen e.g. from Table 5.

Discussion and conclusion

The dynamic as well as the static analysis show that the achievable heat transfer rates from the active layer to rooms on the inner side of the wall are sufficient for common heat loads. When using state-of-the-art thermal insulation (about 0.2 m) there are usually several system concepts available to meet comfort criteria. High insulation thicknesses over 0.10 m, while still having impact on the rooms heat load, do hardly have any effect on the possible heat

transfer to the inside of the room (see the really close curves in the lower part of Figure).

Depending on the wall type variant, the use of very high HTC systems could be redundant as the thermal resistance of the wall might be the prevailing term of the equation. A very effective way in reducing the needed HTC value is choosing a higher fluid temperature which of course opposes the trend towards lower inlet temperatures. Once more this highlights the importance of fitting the façades to the heat generation systems and vice versa. Feeding the system with a low temperature producer e.g. a heat pump in combination with PV will call for a different active layer design as e.g. a solar thermal based concept.

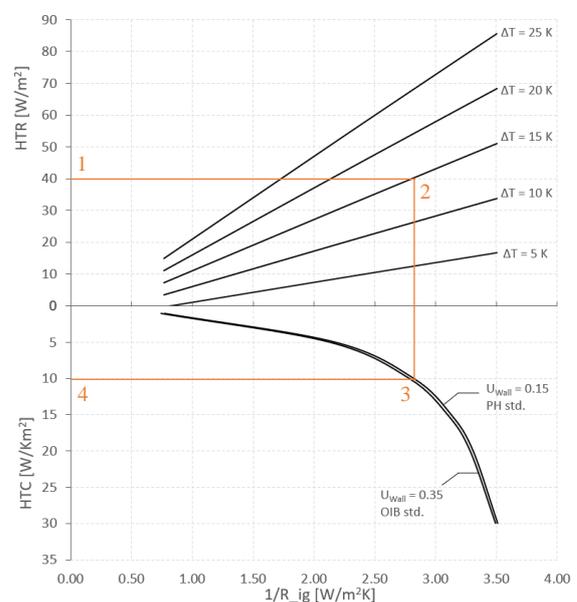


Figure 8 Design diagram for active layer façades on type variant (I) ferro-concrete walls

Based on the results of this research curtain façades with integrated active heating layers are a technology to be considered when retrofitting a building. With foresight to more and more volatile energy systems and a trend on using and storing energy on site, thermal energy storages will get more popular as well. Façade concepts like the ones discussed in this paper enable building structures to serve a double purpose as storages whilst having multiple advantages to standard building renovation. Follow up research projects will be done on the topics of cooling with active layers and predictive controllers for this high latency application.

SUMMARY

This paper views active layer concepts in prefabricated façade elements which can be connected to standard existing buildings from the period 1960's to 1980's. The simulation software IDA ICE was verified to be a suited tool for system

simulations of this type by crosschecking results with the high-resolution FEM software HTflux. With the exception of some scenarios (very low HTC, thin Insulation) the achieved heat transfer rates are suitable for common room heating demands. Depending on the possible control strategies these façade systems can also utilize the thermal mass of the wall for operational flexibility.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors gratefully acknowledge the financial support provided by the ACR - Austrian Cooperative Research (project number SP2018-003-007).

REFERENCES

- Alingsas Schweden 2013. Renovation using passive house technologies, <http://www.iea-annex56.org/Groups/GroupItemID6/16.SE.pdf> accessed 16.3.2020
- ASHRAE 2013. Handbook: Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ISBN 9781936504459
- DIN EN 410 2011. Glas im Bauwesen - Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen; Deutsche Fassung EN 410:2011
- Domenig-Meisinger I., Willensdorfer A., Krauss B., Aschauer J., Lang G. 2007. Erstes Mehrfamilien-Passivhaus im Altbau, final report Energie- und Umweltforschung 21/2007, Wien Austria
- EN 15377 – 1 2009. Heating systems in buildings – Desing of embedded water based surface heating and cooling systems – Part 1: Determination of the design heating and cooling capacity; German Version DIN EN 15377-1:2008
- Energieagentur Steiermark 2016. Energieausweise erstellen – Anleitung -Hinweise – Empfehlungen, u-values from guideline, 6. edition, Graz, Austria
- Fink C., Jähmig D., Ramschak T., Nocke B., Venus D., Höfler K., Ferk H., Mosing M., Fuchs G., Liebinger C., Salg F., Urschler C., Schaffer B., Hainz M., Nussmüller W. 2017. Vorgefertigte Fassadenelemente mit maximal integrierten HVAC-Komponenten und -Systemen zur Bestandssanierung, final report Energieforschungsprogram e!Mission.at – 4. Ausarbeitung
- Frei K., Haas J., Königshofer K., Eisl J., Frankhauser G., Hack R., Karolyi M., Rally H., Stachl T., Steppanek H. 1994. Handbuch für Energieberater, 2nd Edition, JOANNEUM RESEARCH, Institut für Energieforschung, Graz, Austria
- Giwog 2020a. Erfolgreiche Passivhaussanierung Graz, Liebenauer Hauptstraße, <https://www.giwog.at/projekte/referenzen/graz-giwog-passivhaussanierung/> accessed 16.3.2020
- Giwog 2020b. Leoben -Donawitz Stahl – Erzstraße, Passivhaussanierung <http://docplayer.org/78592700-Leoben-donawitz-stahl-erzstrasse.html> accessed 16.3.2020
- Graz – Dieselweg 2007. Refurbishment of a housing complex to passive-house standard, Graz – Dieselweg, project founded by Klima- und Energiefonds
- Höfler, K. et al. 2006. Vorschläge für künftige Sanierungskonzepte unter Berücksichtigung energetischer Einsparpotentiale; Endbericht; Graz
- Höfler, K. 2012. Rehabilitation strategies for an Energy Plus house with prefabricated façade elements in the context of the House of the Future Plus research program, 18th Internationales Holzbau-Forum 2012, Garmisch, Germany
- IEA ECBCS Annex 50 2010. Renovation of residential area Dieselweg 4 / Graz, international energy agency, Prefab retrofit
- IEE Project TABULA 2009 – 2012., "Typology Approach for Building Stock Energy Assessment"; <http://episcopo.eu/iee-project/tabula/>
- ÖNORM 8110-7 2013. Wärmeschutz im Hochhaus – Teil 7: Tabellierte wärmetechnische Bemessungswerte, Austrian Standards Institute, Vienna, Austria
- SIA 2024 2015. Raumnutzungsdaten für Energie- und Gebäudetechnik, standard, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zurich, Switzerland
- Sonnenseite 2015. Innovative außenliegende Wandheizung wird an Uni-Gebäude getestet, article on <http://www.sonnenseite.com/de/wissenschaft/innovative-aussenliegende-wandheizung-wird-an-uni-gebaeude-getestet.html> accessed 16.3.2020
- STATcube 2020. Statistical Database of Statistic Austria, <https://statcube-at/statistik.at/ext/statcube/jsf/login.xhtml?invalidSession=true&reason=Session+not+established>. accessed 2.3.2020

ENERGY PERFORMANCE EVALUATION OF GREEN FACADES IN HIGH-RISE BUILDINGS

P. Bano¹ and S. Dervishi¹

¹Department of Architecture, Epoka University,
Rruga Tiranë-Rinas, Km 12, 1039, Tirana/Albania
E-mail: pbano15@epoka.edu.al, sdervishi@epoka.edu.al

ABSTRACT

Nowadays, green facades have come as a solution providing environmental and socio-economic benefits integrated with high-rise buildings. These facade systems have started to be implemented in the Albanian Mediterranean climate as innovative design strategies. However, a literature gap regarding their quantitative effects on building energy performance exists. Therefore, the present study aims to evaluate the potential of green facade design strategies on thermal and energy performance. For the research purpose, a hypothetical high-rise office building was chosen and several scenarios of green facade strategies have been simulated. The performed simulation results generate a basic framework towards early design decision-making stages.

INTRODUCTION

At present, in the conditions of intensive urbanization, livability in the dense urban areas has become a focal point of concern. The increase in population has promoted the high-rise building models as an alternative to possibly increase the city-space vertically (Saroglou et al., 2017). Many high-rise buildings have taken advantage of glass transparency in their design to create a clear view to the outside (Pino et al., 2011). However, using a high window-to-wall ratio (ratio of the glazed area concerning the total area of the exposed envelope), does not present a sustainable solution since the extensive use of glass cover materials can cause overheating and increase use of energy is required to ensure indoor thermal comfort. Moreover, a large amount of energy is used for air-conditioning systems and lack of insulation causes heat loss problems (Saroglou et al., 2017). With the rapid economic growth, there has been a growing concern about the energy consumption in buildings, commercial developments office buildings especially, where space cooling and heating are needed throughout the year to maintain the desired thermal comfort levels and indoor air quality for the occupants. As a consequence, considering the economic and environmental benefits that can be ensured, it is essential to find new design strategies that may contribute to the improvement of the building energy performance. To positively

contribute to the urban fabric, the design process of the abovementioned building typology requires further research and experimentation, especially the envelope design as the main interface between the indoor and outdoor environment (Saroglou et al., 2017).

In addition, a considerable wall-to-roof ratio is provided by the high-rise typology, offering a large surface area as a valuable potential for greening (Cheng et al., 2010), increasing their efficiency when compared with green roof systems. Furthermore, they act as a barrier that protects the building from radiation and heat penetration (Papadopoulos et al., 2013).

The present research is conducted in the context of Tirana, Albania. As a developing city, Tirana has been involved in a rapid urbanization process. The city has already grown upwards as a response to the increase in population's density and it is expected to have a significant increase in high-rise building construction in the coming years. Reforestation within the city has started to be promoted as a sustainable solution in the conditions of limited land. In the local context, there have been a lot of vertical greenery systems proposed to be implemented in newly constructed high-rise building models. However, there is a literature gap regarding their quantitative effects on building energy performance. Therefore, the developed study aims to evaluate the potential of different green facade designs on thermal performance and energy savings.

LITERATURE REVIEW

Green facade typologies

Several authors have provided classifications of green facade systems to better understand and compare their behavior. Perez et al. (2015) classified green facades into traditional, where plants use the facade material as support, double-skin green facade/curtain; using support systems, and perimeter flowerpots; hanging pots planted around building perimeter. Wong et al. (2009) mentioned that the double-skin green facade is suitable for high-rise buildings as the double skin framework can be constructed in modular panels which can easily integrate into the facade design.

Impact on building systems and energy efficiency

Vegetation can play an important role in regulating the microclimate of the building (Wong et al., 2009). Several studies on the use of plants for solar control prove their potential in controlling solar radiation, reducing cooling load and improving the indoor and outdoor thermal environment. Some previous studies developed by authors such as; Stec et al. (2005) and Larsen et al. (2013) proved that using plants instead of blinds offers better results in terms of shading performance. In addition, the plant's surface temperature never exceeds 35 °C, while in blinds it can exceed 55 °C. Stec et al. (2005) proved that the temperature increase of blinds is about two times higher than leaves for the same solar radiation. Furthermore, Larsen et al. (2014) mentioned that using plants as shading devices is better than using conventional devices because the plants transform the absorbed solar radiation into sensible and latent heat, while a normal shading device transforms the absorbed solar radiation into sensible heat only, that is why temperature increases more when compared with plants.

The cooling effect is another benefit that vegetation systems offer to the building envelope due to the evapotranspiration process. The physical process requires energy and depends on the plant type and exposure according to Perez et al. (2015).

Previous simulation analysis

To develop a better predictive framework for green facade's thermal performance, the scientific literature has been reviewed and it was concluded that whereas previous research studies have contributed into creating a rich theoretical background on several aspects of green facades, there is a lack of quantitative analyses including simulation studies providing a close examination of green facade's thermal performance and energy consumption evaluation. Based on the current review it is found that only three of the greenery system simulation studies (Wong et al., 2009; Larsen et al., 2014; Stec et al., 2005) analyzed the impact of green facades on the thermal performance of the building taking into consideration output results that quantify greenery system's impact on the glazing material parameters rather than opaque walls and most of them use simplified simulation models. Furthermore, no evaluation or simulation study has been previously developed regarding different green facade typologies even though they have already been implemented in buildings worldwide.

Wong et al. (2009) represented the only simulation study that evaluates the thermal impact of greenery systems on the energy performance of a building when the building is fully glazed. The results proved the vertical greenery effectiveness in lowering the mean radiant temperature of a building if the glass facade was fully covered, from 49.94 °C to 45.81 °C

max radiant temperature with a 12.45% in energy reduction.

Larsen et al. (2014) made a brief description of heat transfer mechanisms in a green system, proposed and analyzed two alternative simplified models (BS and WSD) for simulating a double skin facade with plants. According to Larsen et al. (2014) WSD (Window shading Device) model offers a more realistic calculation of heat transfer since in this case, plant emissivity is calculated by the user and plant temperature is variable and calculated by the code. Therefore, it is recommended by the author to be used as a simulation model for a green facade, serving as an initiator for future related studies.

Stec et al. (2005) developed building simulations to analyze the thermal performance of the building with plants in the double-skin facade. Results show that the temperature of the inner glass surface of the window is lower for the double skin facade with plants when compared to the incorporation of blinds. Simulations showed that the capacity is reduced by about 18% and energy consumption for cooling is lowered by about 19%.

METHODOLOGY

Description of the studied building

For the research purpose, a hypothetical 20 stories high-rise office building, measuring 30 m in length by 30 m in width and 3.5 m floor-to-floor height was developed, with a total floor area of 18 000 m² as shown in Figure 1. The structure of the reference model is reinforced concrete as one of the most common construction methods in Albania. Moreover, U-values of the construction materials used in the simulation are 0.43 W/m².K for the insulated roof and 1.95 W/m².K for the internal floors. Table 1 illustrates the glazing properties for all the simulated scenarios. For the simulation purpose, double clear glazing 6mm/13mm air, Saint-Gobain Glass SGG PLANILUX 6mm (commonly used in Albania for fully glazed facades), has been chosen. Further specifications include an aluminum frame with thermal break, resulting in a solar heat gain coefficient (SHGC) of 0.75, U-value of 2.683 W/m².K and 40% glazing area opening. The infiltration rate is 0.5 ACH.

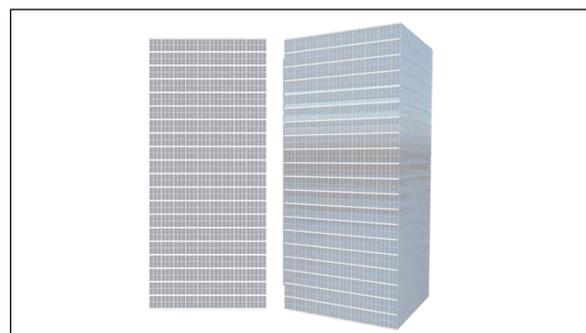


Figure 1: Base case scenario

Table 1:
Glazing properties

GLAZING PROPERTIES	
Glazing type	Double clear 6mm/13mm air Saint - Gobain SGG Planilux 6mm.
Frame properties	Aluminum window frame with thermal break
SHGC (Total solar transmission)	0.75
U-value [W/m ² .K]	2.68
Opening position	Top
% glazing area opens	40
Airtightness [ac/h]	0.5

Climate characterization

The building is assumed to be located in the urban context, in Tirana, Albania. Tirana is located at 41.33° latitude north and 19.82° longitude east and around 100 m above sea level, being at the Mediterranean climatic zone. The average annual temperature is 16.2 °C. Due to geographical position, the mean annual temperatures in Tirana typically oscillate between 7.5 °C in January to 25.6 °C in July. Figure 2 illustrates in a more specified way daily temperature variations of the city. Tirana receives average solar radiation of 1586 KWh/m² yearly (611 KWh/m² diffused radiation). In terms of the precipitation amount, the city receives the majority of precipitation from November to March and the least amount from June to September. The weather file was downloaded from METEONORM v.7.3 (2016) providing hourly weather observations in the weather format (.epw).

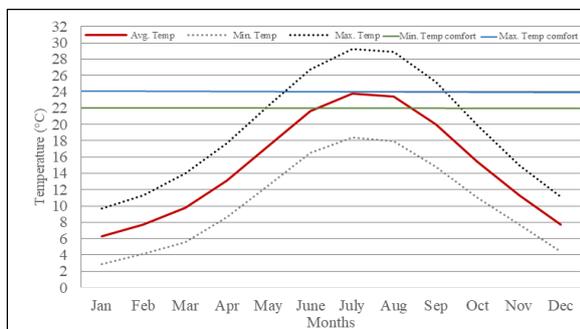


Figure 2: Annual temperatures for the city of Tirana,

Source: Meteonorm software v.7.3

Simulation parameters

As an important part of the model development, the input parameters for the energy simulation process were chosen based on an in-depth evaluation of the relevance of input parameters mentioned or applied in previous research studies. DesignBuilder software (2019) was selected to perform the simulations. The

parameters under evaluation consist of indoor air temperature hourly calculated during summer typical week, exterior and interior surface temperature for the south-oriented facade, calculated for a reference day in summer (25th June). The study analyses and evaluates the monthly energy cooling and heating load for the entire building. The building is simulated under air-conditioned conditions according to specified schedules for heating and cooling set points specifically in relation to current heating or cooling seasons and working schedule occupancy Monday to Friday, 8:30 to 17:30, based on observational data. For obtaining more realistic results, internal gains such as people, lighting, computer equipment are included in the simulation

Furthermore, a passive based scenario (no internal heat sources) is applied to evaluate the indoor air temperature, radiant temperature, interior, and exterior surface temperature to purely determine the effects of vertical greenery systems.

Table 2 represents a summary of the simulated input parameters used. Ventilation schedules have been assumed in accordance with HVAC operation and local climate conditions. Its frequency has been increased when no internal heat sources are applied in order to avoid the greenhouse effect. All the conditioned zones in the building have set points 22 °C for heating and set back 18 °C. The cooling set point temperature is 24 °C during the day and this was set back to 28°C. Natural ventilation set point temperature was set 15 °C. Night ventilation is used in the simulated buildings as a strategy towards decreasing cooling energy demand strategy (Pino et al., 2012). Furthermore, the use of night ventilation is estimated as appropriate for buildings without night occupation, like offices buildings, and for high-temperature changes during cooling periods of the year. For the study purpose, night ventilation by windows is assumed.

Table 2:
Summary of the input parameters used in the simulation

INPUT PARAMETERS	
Total floor area [m ²]	18000
Occupancy density [P/m ²]	0.11
Latent fraction	0.5
Workday profile [h]	(8:30- 17:30) Mon-Fri
Fan coil unit	(4 pipe) water-cooled chiller, waterside economizer
Heating system seasonal [CoP]	0.83
Cooling system seasonal [CoP]	1.67



Figure 3: Simulated scenarios for different green facade design strategies; S_{1B} , S_{1C} , S_{1D} , S_{1E}

S_{1A} represents the base-case scenario as illustrated in Figure 1, with a bare facade without greenery system, with the glazing properties as specified in Table 1.

S_{1B} up to S_{1E} represent different design strategies/alternatives, conceptualized as improvement scenarios/upgrading the base case S_{1A} .

S_{1B} involves the incorporation of the greenery system in building facades, using meshes as support systems, positioned in all four orientations.

S_{1C} involves the incorporation of the greenery system in building facades, using external louvers as support systems, positioned in all four orientations (deciduous plants, LAI 3 and 0.1m plant height).

S_{1D} involves the incorporation of the greenery system in building facades, using planting pots that serve as overhangs modeled as shading elements, 1.5 m in width, positioned in all four orientations. (0.1 m plant height, LAI 3)

S_{1E} involves the incorporation of planting pots 1.5m for large plants around 2 m in height, LAI 3, in balconies 3 m in width, positioned in all four orientations.

The parameters used for simulating greenery systems in scenario S_{1B} are based on Larsen et al. (2014) research on thermal simulations of double skin facades with plants (Window Shading model considered) as illustrated in Table 3. While for developing scenarios S_{1C} , S_{1D} , S_{1E} simplified 3d model and local shading option is used and with the greenery parameters based on Stav et al. (2012) studies as shown in Table 4. To evaluate the thermal and energy performance of the greenery systems, a base case scenario as shown in Figure 1 and a set of four scenarios with greenery applied were established as shown in Figure 3.

Table 3:

Set up properties based on Larsen et al. (2014)

INPUT PARAMETERS	
Solar transmittance	0.2
Solar reflectance	0.3
Visible transmittance	0.06
Visible reflectance	0.09
Thermal emissivity	0.95
Thermal transmittance	0
Thickness [m]	0.001
Conductivity [W/m.K]	0.59
Shade to glass distance [m]	0.3
Top opening multiplier	1
Bottom opening multiplier	1
Left-side opening multiplier	1
Right-side opening multiplier	1
Airflow permeability	0

Table 4:

Vertical greenery system parameters for energy simulation processing

INPUT PARAMETERS	
Height of plants [m]	0.1
Leaf area index	3
Leaf reflectivity	0.25
Leaf emissivity	0.98
Minimum stomatal resistance [s/m]	180
Roughness	Medium smooth
Thickness [m]	0.08
Conductivity of dry soil [W/m.K]	0.4
Density of dry soil [kg/m ³]	641
Specific heat of dry soil [J/kg.K]	1100
Thermal absorptance	0.95
Solar absorptance (soil)	0.8
Visible absorptance	0.7
Saturation volumetric moisture content of the soil layer	0.4
Residual volumetric moisture content of the soil layer	0.01
Initial volumetric moisture content of the soil layer	0.2
Moisture diffusion calculation method	Simple
Irrigation type	Smart
Irrigation rate [m/h]	0.003
Irrigation schedule	7:00-9:00 AM everyday

SIMULATION RESULTS

Figures 4-10 below represent all the simulation results for all the parameters under evaluation, analyzing energy and thermal performance of all the chosen scenarios; for the base case scenario with the bare facade S_{1A} and all scenarios S_{1B}, S_{1C}, S_{1D}, and S_{1E} when the green facade is applied. Specifically, Figures 4-6 illustrate the comparison of simulated energy cooling, heating and total energy demand (kWh.m².Y⁻¹) of the simulated scenarios. Figures 7-10 illustrate the thermal performance of all the simulated scenarios.

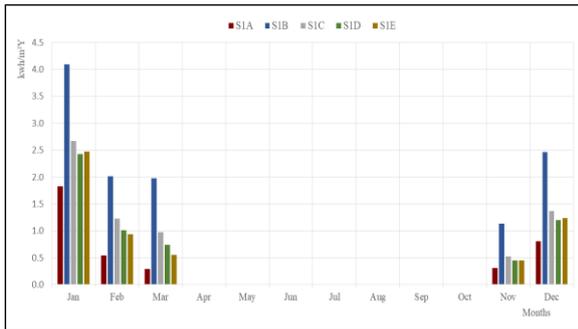


Figure 4: Comparison of simulated energy heating demand (kWh.m².Y⁻¹) of the simulated scenarios

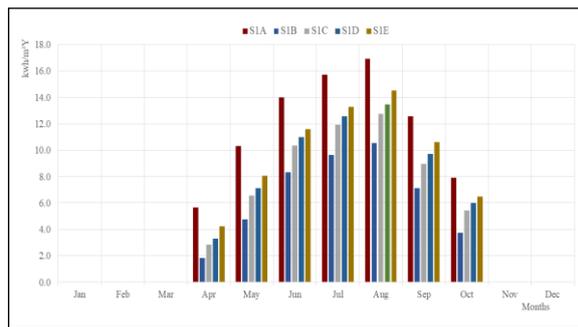


Figure 5: Comparison of simulated energy cooling demand (kWh.m².Y⁻¹) of the simulated scenarios

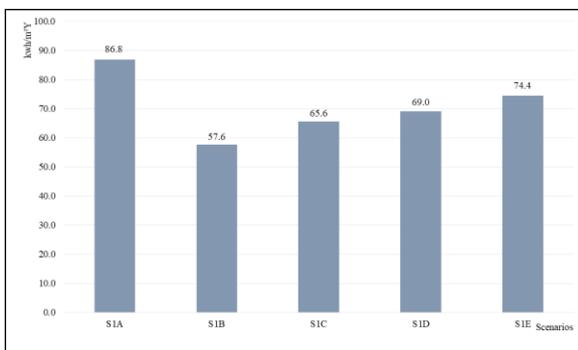


Figure 6: Comparison of simulated total yearly energy demand (kWh.m².Y⁻¹) of the simulated scenarios

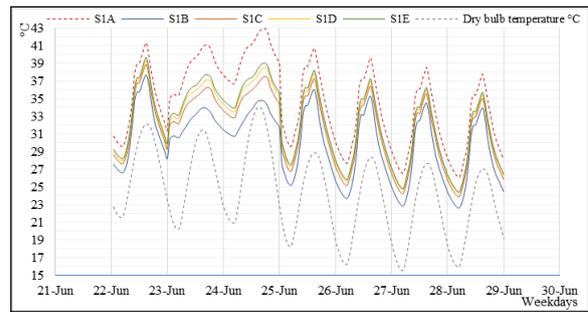


Figure 7: Simulated indoor air temperature and dry-bulb temperature from the weather file, for the summer typical week (22 June-29 June)

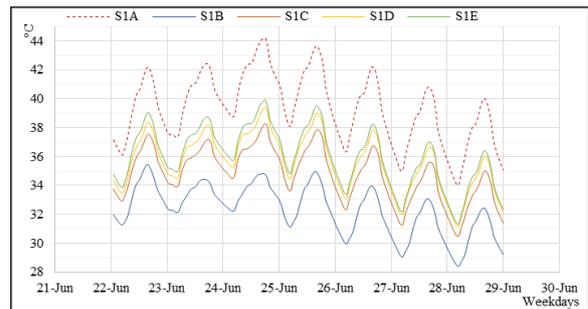


Figure 8: Simulated radiant temperature, for the summer typical week (22 June-29 June)

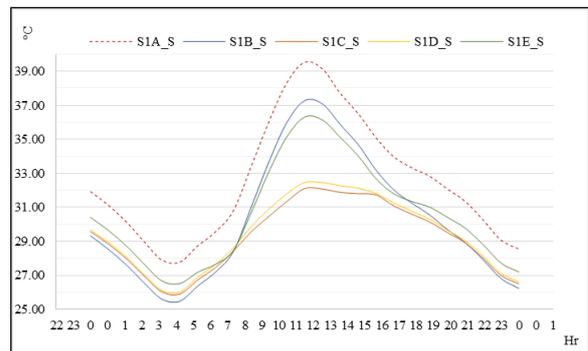


Figure 9: Simulated exterior glass surface temperature for the south-oriented facade, in a typical summer day, 25 June

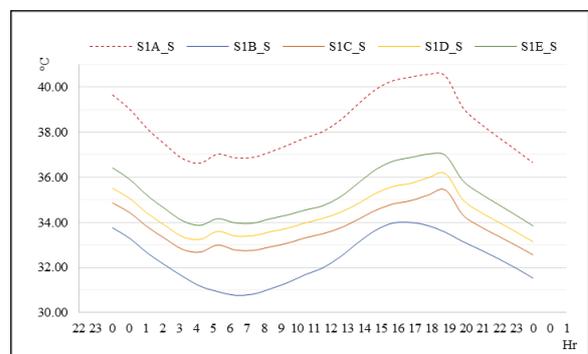


Figure 10: Simulated interior glass surface temperature for the south-oriented facade, in a typical summer day, 25 June

DISCUSSION

Heating and cooling loads

As illustrated in Figure 4, one major observation is that incorporating plants in the building envelope significantly increases heating demand when compared with the base case scenario (without greenery). The highest heating demand increase is observed in January, the coldest month from 1.8 kWh.m²Y⁻¹ in S₁A scenario to 4.1 kWh.m²Y⁻¹, in S₁B scenario. Moreover, the annual energy heating load is more than twice higher (increased by 210.7%) in the second scenario, when applying greenery using mesh support systems. It is followed by S₁C scenario with a 79.8% increase, S₁D with a 55.1% increase and S₁E with a 49.8% increase.

Referring to Figure 5, comparing the five scenarios we understand that greenery systems represent an effective strategy towards significantly reducing cooling demand. The highest reduction is observed in August, the hottest month, from 16.9 kWh.m²Y⁻¹ in S₁A scenario to 10.5 kWh.m²Y⁻¹ in S₁B scenario. Simulations showed that the capacity of the cooling system and yearly energy consumption is reduced for the building with plants in the double-skin facade. Table 5 shows a comparison of the greenery effectiveness of the simulated scenarios. The highest greenery effectiveness is achieved in S₁B scenario with the addition of greenery systems in building facades, using meshes as support systems. The annual energy consumption for cooling is reduced by 44.7% in the S₁B scenario. It is followed by S₁C scenario with a 29.1% reduction and S₁D with a 23.9% reduction. The lowest greenery effectiveness is reached in S₁E scenario when incorporating planting about 2 m in height, in balconies 3 m in depth. Cooling energy consumption is lowered by 17.1% in the S₁E scenario. As illustrated in Figure 6 and Table 5, S₁B is the most efficient scenario with 57.6 kWh.m²Y⁻¹ total energy consumed and 33.6% greenery effectiveness, followed by S₁C with 65.6 kWh.m²Y⁻¹ total energy consumed and 24.4% effectiveness and S₁D scenario with 69 kWh.m²Y⁻¹ total energy consumed and 20.5% effectiveness. While S₁E resulted the least efficient scenario with 74.4 kWh.m²Y⁻¹ total energy consumed and 14.2% greenery effectiveness.

Table 5:

Annual simulation results obtained for all the scenarios with greenery system applied

Scenario	Heating reduction [%]	Cooling reduction [%]	Total energy reduction [%]
S ₁ B	-210.7	44.7	33.6
S ₁ C	-79.8	29.1	24.4
S ₁ D	-55.1	23.9	20.5
S ₁ E	-49.8	17.1	14.2

Simulation results suggest using deciduous plants for maximum efficiency in both winter and summer periods. They create the possibility of applying a self-

adjustable shading system. During cold periods these plants will shed leaves. In the winter the solar radiation will go through the facade and will generate the heat to cover the heat losses. (Stec et al., 2005) In the summer, plants will serve as a barrier that prevents extensive solar radiation allowing just daylight entering the office space. (Stec et al., 2005)

Air temperature

As shown in Figure 7, the air temperature results are lowered for the scenarios with plants when compared with the bare facade scenario. Scenario S₁A shows that a full glass facade building may result in an uncomfortable and inhabitable environment, where air temperature reaches 43 °C on 24 June during summer typical week. The presence of greenery systems applied using mesh support systems is able to lower the air temperature values from 43 °C to 35 °C, resulting in an 8°C temperature reduction. It is followed by S₁C 37.4 °C, and S₁D 38.4 °C. Also, the lowest temperature reduction is observed in S₁E scenario from 43 °C to 39 °C, resulting in a 4 °C temperature reduction, when incorporating plants around 2 m in height, in balconies 3 m in depth.

Radiant temperature

As illustrated in Figure 8, radiant temperature results are lowered for the scenarios with plants when compared with the bare facade scenario. The highest reduction is observed in S₁B. In scenario S₁B, the presence of greenery system helps in reducing the radiant temperature significantly, with a maximum of the radiant temperature of 35 °C compared to 44 °C from S₁A scenario, on 24 June during summer typical week. Furthermore, as the envelope is mainly composed of double clear glass, solar radiation remains the main heat source, and shading is an important parameter to consider. The results are followed by S₁C 38 °C and S₁D 39.4 °C. Also, the lowest temperature reduction is observed in the S₁E scenario from 43 °C to 40 °C, resulting in a 3 °C temperature reduction, when incorporating plants around 2 m in height, in balconies 3 m in depth

Exterior and interior glass surface temperature

Table 6:

Summary of the simulation results for the exterior and interior surface temperature calculated

SOUTH ORIENTATION, PEAK HOUR: 12:00			
	Exterior	Interior	ΔT
S ₁ A	39.12	38.52	0.6
S ₁ B	37.07	32.48	4.59
S ₁ C	32.07	33.75	-1.68
S ₁ D	32.45	34.45	-2
S ₁ E	36.13	35.13	1

Based on the hourly simulation results of the glass surface temperatures in a typical summer day 25 June, as shown in Figures 9-10, for the south-oriented facade, in all cases, the highest exterior surface temperature is reached during midday, when the

incident solar radiation is maximum. S₁C results the most efficient scenario where the surface temperature is 32.07 °C, or 7.05 °C lower when compared with the base case scenario with the bare window (39.12 °C). However, it is the second most efficient scenario when comparisons are made for the interior surface temperature, 33.75 °C or 4.77 °C lower than base case scenario 38.52 °C, with 1.68 °C temperature difference (exterior-interior).

The second most efficient scenario is S₁D with the greenery systems applied in building facades, using planting pots 1.5 m that serve as overhangs for shading, where the surface temperature is 32.45 °C, or 6.67 °C lower when compared with the base case scenario. However, it is the third most efficient scenario when comparisons are made for the interior surface temperature, 34.45 °C or 4.07 °C lower than base case scenario 38.52 °C, with 2 °C temperature difference (exterior-interior).

The third most efficient scenario is S₁E with the greenery systems applied in building facades using planting pots 1.5 m for large plants around 2 m in height, in balconies 3 m in-depth, where the surface temperature is 36.13 °C, or 2.99 °C lower when compared with the base case scenario. However, it is the least efficient scenario when comparisons are made for the interior surface temperature, 35.13 °C or 3.39 °C lower than base case scenario 38.52 °C, with only 1 °C temperature difference (exterior-interior) as shown in Table 6.

The least efficient scenario is S₁B, with the greenery systems applied in building facades using support systems (meshes), where the surface temperature is 37.07 °C, or 2.05 °C lower when compared with the base case scenario. However, it is the most efficient scenario when comparisons are made for the interior surface temperature, 32.48 °C or 6.04 °C lower than base case scenario 38.52 °C, with 4.59 °C temperature difference (exterior-interior) as shown in Table 6.

CONCLUSION

Although green facades have already been integrated into building designs for aesthetic reasons, their application as a technology to regulate internal building temperatures is novel. The case study of green facades presents an invitation to initiate an analytical and quantitative approach on the green facade thermal and energy performance, hoping to be continued in the future. The present research aims to evaluate the potential of different green facade designs on thermal performance and energy savings.

Simulation results showed that incorporating plants in the building envelope significantly increases heating demand when compared with the scenario without greenery, while on the other hand it positively influences cooling loads. The results suggest using deciduous plants for maximum efficiency in both the winter and summer periods. The highest greenery effectiveness is achieved in S₁B scenario with the

addition of greenery systems in building facades, using meshes as support systems. The highest greenery effectiveness is achieved in S₁B scenario, where the annual energy consumption for cooling is lowered by about 44.7% and 33.6% total energy consumption.

Also, results show that the presence of greenery systems applied using mesh support systems can lower the air temperature values from 43 °C to 35 °C, resulting in an 8 °C temperature reduction and also it helps in reducing the radiant temperature significantly, with a maximum of the radiant temperature of 35 °C compared to 44 °C in S₁A scenario.

For the south-oriented facade, in all cases, the highest exterior surface temperature is reached during midday, when the incident solar radiation is in its maximum value. S₁C is the most efficient scenario where the surface temperature is 32.07 °C, or 7.05 °C lower when compared with the base case scenario with the bare window where the temperature reaches 39.12 °C.

Simulated results highlight that there are promising thermal and energy benefits from green facade applications. To further establish the study results, experimental studies on actual building facades should be performed, so that simulation results can be discussed and compared for a better understanding. Therefore, several priority areas are suggested for future inquiry.

In the present research, as the results of the present study do not seek to design HVAC systems, tentative schedules for heating, cooling, natural ventilation, occupancy, and set-point parameters were designed by authors based on evaluating the current literature on this matter and by taking into consideration the local climate. Therefore, future work needs to be done specifically related to HVAC systems and schedule design, to make further comparisons between several studies.

Furthermore, much work is needed to enhance the understanding of the physiological and morphological traits of plants and to inform the selection of new species for green facades. Therefore, an effort should be done into establishing an interdisciplinary approach between architecture, engineering, plant biology, and horticulture, to avoid research design problems. Also, a few improvements and updates to the software should be performed to avoid limitations. Case S₁B uses a simplified model (Window shading device object) based on parameters and available options offered by the simulation software as illustrated in Table 3. Unfortunately, there is no option for designing/ simulating the meshes as green facade support systems in DesignBuilder (software limitation).

All in all, although simulation and evaluation through software may face limitations due to the inability to make comparisons with real-life situations, the developed study represents an effective and well

documented first step towards an analysis approach on the green facade performance, hoping to be continued in the future.

ACKNOWLEDGEMENT

The research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

REFERENCES

- Cheng, C. Y., Cheung, K. K. S., & Chu, L. M. 2010. Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls. *Building and Environment*, 45(8), 1779–1787.
- DesignBuilder. (2019). DesignBuilder software v.6. Retrieved from <http://www.designbuilder.co.uk/>
- Larsen, S. F., Filippín, C., & Lesino, G. 2014. Thermal simulation of a double skin façade with plants. In *Energy Procedia* (Vol. 57, pp. 1763–1772). Elsevier Ltd.
- Meteonorm. (2016). Meteonorm: Irradiation data for every place on Earth. Retrieved from <http://www.meteonorm.com/downloads>
- Papadopoulou, G. I. 2013. *Green Walls as element of bioclimatic design in Mediterranean Urban Buildings*.
- Pérez-Urrestarazu, L., Fernández-Cañero, R., Franco-Salas, A., & Egea, G. 2015. Vertical Greening Systems and Sustainable Cities. *Journal of Urban Technology*, 22(4), 65–85.
- Pino, A., Bustamante, W., Escobar, R., & Pino, F. 2012. Thermal and lighting behavior of office buildings in Santiago of Chile. *Energy and Buildings*, 47, 441–449.
- Saroglou, T., Meir, I. A., Theodosiou, T., & Givoni, B. 2017. Towards energy efficient skyscrapers. *Energy and Buildings*, 149, 437–449
- Stav, Y., & Lawson, G. 2011. Vertical vegetation design decisions and their impact on energy consumption in subtropical cities. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 155, 489–500.
- Stec, W. J., Van Paassen, A. H. C., & Maziarz, A. 2005. Modelling the double skin façade with plants. *Energy and Buildings*, 37(5), 419–427.
- Wong, N. H., Tan, A. Y. K., Tan, P. Y., & Wong, N. C. 2009. Energy simulation of vertical greenery systems. *Energy and Buildings*, 41(12), 1401–140

MODELING OF SOLAR RADIATION TRANSMISSION THROUGH TRIPLE GLAZING BASED ONLY ON ON-SITE MEASUREMENTS

F. Veynandt¹ and C. Heschl¹

¹Fachhochschule Burgenland GmbH, Eisenstadt, Austria

ABSTRACT

A model is developed which can calculate the irradiance behind a glazed façade, based on measured incident solar radiation. Data from a real office building is used to establish and test the model. On-site irradiance measurements on both sides of the facades are exploited to calibrate the model. The main parameters are the average diffuse transmittance and a correlation for the direct transmittance, as a function of the incidence angle. Correction of the measurements, including the frame reflection, are taken into account. Hence, the model contributes to the solar heat flux identification, in the perspective of model predictive control application.

INTRODUCTION

To achieve the transition to a sustainable and decarbonized society, low energy buildings with grid friendly operating control strategies are needed. Model Predictive Control (MPC) is an interesting approach tackling these challenges (Serale et al. 2018). With information on energy supply (renewable energy available, market price) and energy demand forecast (needs of the building), an MPC system can optimize the operation of the building by making the most of the demand side flexibility. MPC requires a model to predict the energy consumption of the building under consideration of the thermal comfort constraints. This model can be established based on construction data and operation history. To model the physical behavior of the building, the relevant heat fluxes must be identified. In particular for buildings with a high share of glazed façades, understanding and modelling the solar irradiance balance through glazed elements is strategic.

Several approaches are possible to model the optical behavior of a glazing, which can be classified into detailed and simplified models (Rubin et al 1999). Detailed physical models involve the optical properties of each panes or elements of the glazed façade. This approach enables the modeling of complex fenestration systems, including coatings and shading (Laouadi et al. 2007). Laboratory measurements or detailed data from manufacturer are required. In the mentioned classification, simplified models can be empirical, semi-empirical, monolithic or thin-film models. A single thin-film model reduces the glazing to three parameters, possibly spectrally

defined (Maestre et al. 2007). The parameters are identified from spectral measurements at normal incidence angle. Additional models extend normal measurement data to any incidence angle (Roos et al. 2001). In an existing building, measurements from real operation can be obtained and an empirical approach is suitable.

In the present study, an office building with a three pane glazing façade is investigated. Measurement in real operation are used to characterize the façade with an empirical model. This work supports the development of an MPC control system for this building.

BUILDING AND INSTRUMENTATION

The living-lab Energetikum is an office building equipped with extensive sensor technology to monitor in details the behavior of the building. Several technologies are also implemented in the building: heating, cooling, ventilation, shading, as well as energy production and storage. This offers many opportunities for experimenting and learning on these technologies.

The South and West façades are entirely covered with triple-pane glazing. According to information obtained from the manufacturer, the first and third panes have a low-emissivity coating on the inner side of the glazing. The glazing has an expected solar transmittance of 38 % and solar heat gain coefficient of 50 %. The adjustable slat blinds are not analysed in this paper. Figure 1 gives a view of the building from outside and of the room under study from inside. Details about the building and the irradiance monitoring equipment are described in a separate report (Zalewski 2018). Table 1 lists all symbols used in the following.

To offer a solution for the case when no detailed information about the glazing is available, we develop a measurement based model. Data from one year monitoring period is used for the analysis: from 8 June 2018 to 7 June 2019. Table 2 presents the relevant shortwave irradiance sensors for the façade analysis.

Table 1: List of symbols

Symbol	Description
$a, b, c,$	parameters of the fitting curve
d, e	

Symbol	Description
F_{SF}	view factor from sensor surface S to frame surface F (fraction of radiation leaving S which directly falls on F)
H, W, L	height, width, length (m)
I	irradiance (W/m^2)
n	refractive index (-)
α	absorptivity or absorptance, fraction of irradiance absorbed on an ideal resp. real surface (-)
θ	off-normal incident angle of direct irradiance (W/m^2)
ρ	reflectivity or reflectance, fraction of irradiance reflected on an ideal, resp. real surface (-)
σ	standard deviation
τ	transmissivity or transmittance, fraction of irradiance transmitted through an ideal, resp. real material, e.g. glazing (-)
Φ	azimuth angle from South, positive towards West ($^\circ$)
Superscripts:	
s	south, relative to south façade
w	west, relative to west façade
$*$	measured, available data from measurement
$'$	property relative to interaction in outwards direction
Subscripts:	
a	air
B	beam, referring to direct irradiance
c	fitting curve
$D, Diff$	diffuse, referring to diffuse irradiance
F	frame
g	glass (material), relative to glass surface
G	global, total irradiance (direct & diffuse)
h	horizontal (surface)
i	in, inside the building
j	interface index in the glazing
min	minimum
max	maximum
o	out, outside the building
s	sensor
$SF, S2F$	sensor to frame
$spec$	specular
th	theory

Table 2:

Summary of relevant short wave irradiance sensors with variable names (in blue)

Instrument	Position	Orientation	Measurement	
			outside	inside
Pyranometer (global irradiance)	South façade	vertical	I_{Go}^{S*}	I_{Gi}^{S*}
	West façade	vertical	I_{Go}^{W*}	I_{Gi}^{W*}
	Roof	horizontal	I_{Gh}^*	
Pyrheliometer (direct irr.)	Roof	normal to sun	I_B^*	

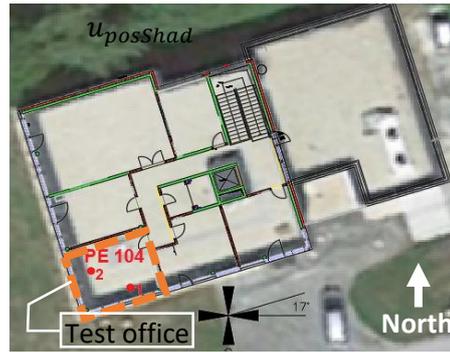


Figure 1: Top: Aerial view of the living laboratory (Zalewski 2018). Bottom: Test office room with measurement equipment on both façades (photo 28.06.2019)

MODELLING

Parameters identification for inside irradiance

The method is the same for both South (superscript s) and West (replace superscript with w) façades.

We are interested in the direct and diffuse share in the global short wave solar irradiance inside, after the glazing, I_{Gi}^{S*} :

$$I_{Gi}^{S*} = I_{Di}^S + I_{Bi}^S \quad (1)$$

with I_{Di}^S and I_{Bi}^S the respectively direct and diffuse irradiances inside in the façade plane.

The diffuse irradiance I_{Di}^S is:

$$I_{Di}^S = \tau_D^S \cdot I_{Do}^S = \tau_D^S \cdot (I_{Go}^{S*} - I_{Bo}) = \tau_D^S \cdot (I_{Go}^{S*} - \cos \theta^S \cdot I_B^*) \quad (2)$$

with τ_D^S diffuse transmittance, I_{Do}^S diffuse irradiance outside on façade plane, I_{Go}^{S*} global irradiance outside on façade plane, I_{Bo} direct irradiance outside on façade plane, I_B^* direct normal irradiance, θ^S incidence angle on façade.

The diffuse transmittance τ_D^S is then evaluated from measurements at times without direct irradiance:

$$\tau_D^S = \frac{I_{Gi}^{S*}}{I_{Go}^{S*}}, \text{ when } I_B^* = 0 \text{ W/m}^2 \quad (3)$$

The direct irradiance I_{Bi}^S is:

$$I_{Bi}^S = \tau_B^S(\theta^S) I_{Bo} = \tau_B^S(\theta^S) I_B^* \cos \theta^S \quad (4)$$

with τ_B^S direct transmittance, as a function of θ^S off-normal incidence angle on the façade.

The direct transmittance τ_B^s can be evaluated from measurements in function of the incidence angle θ^s , combining equations (1, (2 and (4):

$$\tau_B^s(\theta^s) = \frac{I_{Gi}^{s*} - \tau_D^s \cdot (I_{G0}^{s*} - \cos \theta^s \cdot I_B^*)}{\cos \theta^s \cdot I_B^*} \quad (5)$$

In this way, the transmittances τ_D^s and $\tau_B^s(\theta^s)$ are identified from measurement. Assuming isotropic transmission, the position of the sun relative to the façade can be characterized by the incidence angle θ^s , which is calculated from the orientation of the façade and the time and date of the year. The solar position is calculated with a simple algorithm, precise enough for engineering calculations (Duffie et al. 2006, p. 10-15).

Local effects on sensors

The value measured from a sensor gives a punctual information, while the integrated information over the entire glazing surface is of interest for the energy balance in the building. Local variations are mainly due to: (i) the sensor position and orientation; (ii) shading from the horizon, when elevation angle is low, and from the frame, when the angle of incidence is high; (iii) reflection on the frame, causing higher irradiance on the sensor; (iv) partially drawn shutters, so the sensor indicates either the shaded part or the non-shaded part situation; (v) errors inherent to the sensor technology. For the latter, high quality pyranometers (SMP10 from Kipp&Zonen) are used, which keeps measurement errors from the sensors very low. For example, the directional response for beam radiation has less than 10 W/m² deviation from the theoretical cosine law for up to 80° inclination with 1000 W/m² irradiance at normal incidence. The influence of shutters is not analysed in this paper. We focus here on the first three aspects, which are detailed hereafter in this section.

Sensor position and orientation

The orientation of the sensor, if not exactly parallel to the façade, causes a systematic error. The position and orientation of the sensors have been checked through direct measurements, as well as through post-processing the measurement data. In the daily irradiance profiles, misalignment creates a systematic shift of the measurement in comparison to the recalculated irradiance from global horizontal measurement and geometrical parameters for position and orientation. The best fit is obtained for the actual position of the sensor. If the building orientation is known like in our case, a correction of the possible misalignment of the sensors is achieved (-0.5 to -3.5° in our case). If the orientation of the building is not known, this approach enables the determination of the façade orientation purely from measurement data analysis.

Shading from the horizon and from the frame

The horizon angular height has also been derived from measurements, observing at which angle a practically

shut down of direct irradiance occurs (0° on South, 4.5° on West).

Shading from the frame also cuts the direct irradiance from the sensor, but solar irradiance continues to enter the building. This has to be taken into account when the actual solar gains in the room are calculated (out of the scope of this paper). The maximum incidence angle for the sensor to receive light from the sun is expressed in terms of relative azimuth. The upper and lower limits on relative azimuth Φ for which direct irradiance is measured from the sensors are: $-76.7^\circ < \Phi^s < +68.2^\circ$ and $-71.4^\circ < \Phi^w < +35.7^\circ$, respectively on South and West façade.

Reflection from the frame

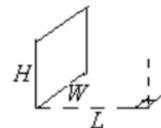
The frame reflectance is taken into account on the West façade. This has a significant impact only on the sensor from this façade, because it is close to the side of the window. The direct irradiance reflecting on the frame in diffuse and specular ways increases the irradiance on the inside sensor. A simple model can describe this effect, considering the reflectance of the frame painting in two components: specular reflectance ($\rho_{SpecF}(0^\circ) = 0.1$ for normal incidence angle and $\rho_{SpecF}(90^\circ) = 1$, following Fresnel laws) and diffuse reflectance ($\rho_{DiffF} = 0.8$ isotropic) (see ALUCOBOND ARCHITECTURAL material properties data base).

Diffuse reflectance is mainly –and here exclusively considered– as due to diffuse reflection of direct solar radiation:

$$\rho_{DiffF2S}^w = F_{SF}^w \rho_{DiffF} \quad (6)$$

with F_{SF}^w the view factor from the sensor to the northern-side frame. The view factor F_{SF}^w of the glazing frame from the sensor can be calculated using the formula for a patch to rectangular plate in perpendicular configuration [see catalogue of view factors: (Modest Michael 2013, 1)]:

From small planar patch at 90° to rectangular plate of sides $H=0.18\text{m}$ and $W=1\text{m}$ at a separation $L=0.185\text{m}$, with $h = \frac{H}{W}$, $e = \frac{L}{W}$, $z = \sqrt{h^2 + e^2}$:



$$F_{SF}^w = \frac{1}{2\pi} \left(\tan^{-1} \frac{1}{e} - \frac{e}{z} \tan^{-1} \frac{1}{z} \right) \quad (7)$$

For the sensor on the West façade: $F_{SF}^w = 0.0705$

Specular reflectance depends on the sun position:

$$\begin{cases} \rho_{SpecF2S}^w = \rho_{SpecF}^w & \text{if } \Phi_{min}^w < \Phi^w < \Phi_{max}^w \\ \rho_{SpecF2S}^w = 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

with Φ^w the relative azimuth of the sun on the facade within its limits [Φ_{min}^w ; Φ_{max}^w].

The irradiance from the diffuse and specular reflection of direct irradiance on the frame is then transmitted through the glazing and accounts for an additional factor $\tau_{B,SF}^w$ to correct the measured transmittance τ_B^{w*}

on the sensor from the actual glazing transmittance τ_B^w :

$$\tau_B^{w*} = \tau_B^w + \tau_{B_SF}^w \quad (9)$$

with:

$$\tau_{B_SF}^w = \rho_{DiffF2S} \tau_D^w + \rho_{SpecF2S} \tau_B^w \quad (10)$$

The actual glazing transmittance can then be expressed as follow:

$$\tau_B^w = \frac{\tau_B^{w*} - F_{SF} \rho_{DiffF2S}}{1 + \rho_{SpecF2S}} \quad (11)$$

The calculation of the reflection on the frame shows a significant influence on the West façade sensor with up to 15 % additional irradiance on the sensor as the curve in Figure 2 shows. The measured direct transmittance is overestimated in comparison to the glazing direct transmittance, for relative azimuth angles between -77° and -36° . The reference curve for the glazing direct transmittance in Figure 2 is using a correlation for triple glazing (Arasteh et al. 2009).

The same calculation on the South façade reveals only 1% increase, because the sensor is far from the side frame (wider window).

The measurement data in the following are taking into account the corrections for misalignment of the sensors and for the frame reflection. In the perspective of calculating the short wave solar irradiance gains, the limitations on the relative azimuth angle, through shading of the sensor, are also identified.

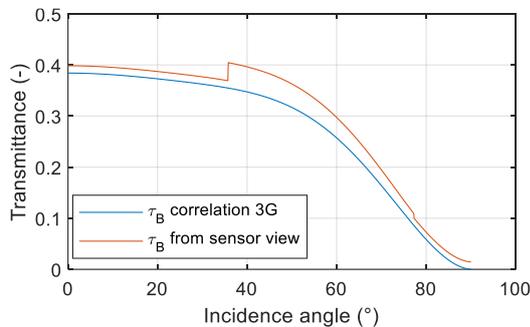


Figure 2: Direct transmittance of triple glazing from correlation (τ_B correlation 3G) and from correlation with correction for frame reflection on the sensor (τ_B from sensor view)

Diffuse transmittance

Measurement points without direct irradiance are selected over the entire measurement period (8 June 2018 to 7 June 2019) by verifying all the following conditions: $I_B^* < 10W/m^2$; $I_{Go}^S > 20W/m^2$; $I_{Gi}^S > 5W/m^2$; no shadow from shading system nor from horizon. The average diffuse transmittance on the selected “diffuse-only” data is (standard deviation into brackets):

- on South façade $\tau_D^S = 0.27$ ($\sigma_{\tau_D^S}^{WS} = 0.054$)
- on West façade $\tau_D^W = 0.25$ ($\sigma_{\tau_D^W}^W = 0.066$).

Although both façades have the same glazing construction, several factors can explain the different

effective diffuse transmittance between South and West, such as differences: (i) in the window width, (ii) in the non-isotropic diffuse sky, (iii) in the ground reflectance, in the data points (different times) matching the selection criteria for “diffuse-only” irradiance.

On the same façade, the diffuse reflectance is also submitted to variations of the sky (brightness variation of the sky with the weather: clear or cloudy sky) and to variations of the ground (albedo variation of diffuse reflecting bodies: vegetation summer/winter cycle, snow cover... and non-ideal Lambert diffusion because of partially specular reflecting bodies). Given the numerous influencing factors, the standard deviation is interestingly not too high.

Figure 3 shows on the left hand side a comparison of the diffuse irradiance calculation on measurements from cloudy days. A good estimation of the inside diffuse irradiance is achieved, based on outside diffuse irradiance. The frequency distribution of the calculated diffuse transmittance over all selected “diffuse-only” measurement points is also plotted on the right hand side in Figure 3.

On both façades, the average diffuse transmittance experiences a slight decreasing trend over the year, as in Figure 6: the linear fit over the monitoring period shows 8 % decrease on South and 6 % on West. This could be the effect of dust accumulation.

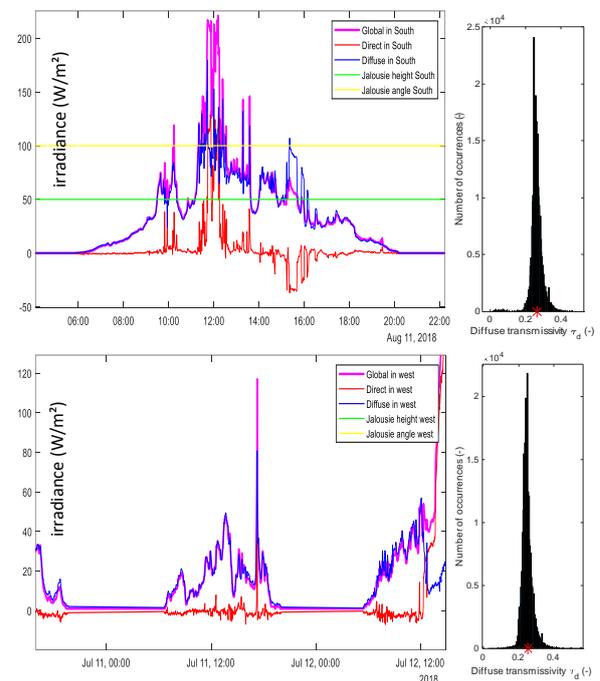


Figure 3: Top: South, Bottom: West. // Left: Comparison of calculated diffuse irradiance and measured global irradiance on a day with mostly diffuse irradiance. Direct irradiance is deducted from the difference (global – diffuse). Right: Frequency distribution of diffuse transmittance including all selected measurement points with diffuse irradiance only.

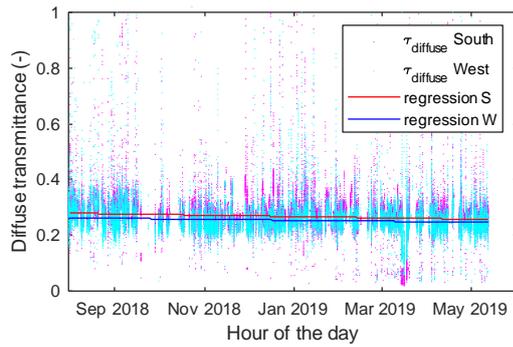


Figure 4: Evolution of diffuse transmittance over the measurement period: “diffuse-only” data points and linear regression on South and on West.

Direct transmittance

Direct transmittance depends on the incidence angle on the glass surface. The direct transmittance, for example on South facade τ_{BC}^S , of direct light through a triple glazing can be fitted to a correlation of the following form (Arasteh et al. 2009):

$$\tau_{BC}^S = a^S \cos^4 \theta^S + b^S \cos^3 \theta^S + c^S \cos^2 \theta^S + d^S \cos \theta^S + e^S \quad (12)$$

with θ^S the incidence angle of direct irradiance on South and a^S, b^S, c^S, d^S and e^S constant fitting coefficients.

The direct transmittance of the glazing is evaluated by regression from measurement data, after filtering out irrelevant data points, step by step. The colors on Figure 7 illustrate the different filter steps: shadow from building structure or night, shadow from shutters, direct irradiance below 10 W/m², air mass over 2.5. The remaining points are mostly relevant to evaluate direct transmittance τ_B^S from the ratio between direct irradiance levels inside I_{Bi}^S versus outside I_{Bo}^S :

$$\tau_B = \frac{I_{Bi}}{I_{Bo}} \quad (13)$$

with:

$$I_{Bo}^S = I_B^* \cos \theta^S \quad (14)$$

$$I_{Bi}^S = I_{Gi}^S - \tau_D^S (I_{Go}^S - I_{Bo}^S) \quad (15)$$

Table 3 shows the fitting coefficients of the correlation. Figure shows the data points and the fitted curve obtained on South and West facades with the correlation.

Table 3: Fitting coefficients for transmittance as a function of incidence angle $\tau_{BC}^S(\theta^S)$ and $\tau_{BC}^W(\theta^W)$

	a	b	c	d	e
South	-0.6427	1.6037	-1.8346	1.3887	-0.1603
West	-6.3172	15.5802	-14.3732	6.0115	-0.6563

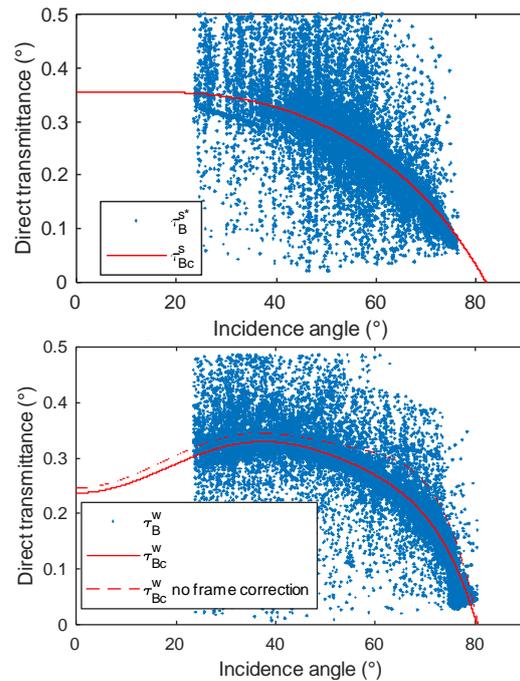


Figure 5: Fitted curve of transmittance τ_{BC} against incidence angle on South (top) and West (bottom) with data points from measurements τ_B . The dotted line, for comparison, is obtained from measurements without correction for frame reflection.

Direct transmissivity in theory

To interpret better the measured data and identify influencing parameters, the theoretical equation of transmissivity can be investigated, by applying the light propagation laws through a triple glazing. Figure 6 illustrates some of the possible interactions and defines the notations used in equation (). The direct transmissivity $\tau_{B,th}$ can be expressed in equation (), considering all combinations of reflections or transmissions on the glass-air interfaces.

$$\tau_{B,th} = \tau_1 \left(1 + \tau_2 \left(\rho_3 + \tau_3 \left(\rho_4 + \tau_4 \left(\rho_5 + \tau_5 \rho_6 \cdot \frac{1}{1-\rho_5\rho_6} \tau_5' \right) \frac{1}{1-\rho_4\rho_5} \tau_4' \right) \frac{1}{1-\rho_3\rho_4} \tau_3' \right) \frac{1}{1-\rho_2\rho_3} \tau_2 \rho_1' \right) \tau_2 \left(1 + \tau_3 \left(\rho_4 + \tau_4 \left(\rho_5 + \tau_5 \rho_6 \frac{1}{1-\rho_5\rho_6} \tau_5' \right) \frac{1}{1-\rho_4\rho_5} \tau_4' \right) \frac{1}{1-\rho_3\rho_4} \tau_3' \rho_2' \right) \frac{1}{1-\rho_3\rho_2} \tau_3 \left(1 + \tau_4 \left(\rho_5 + \tau_5 \rho_6 \frac{1}{1-\rho_5\rho_6} \tau_5' \right) \cdot \frac{1}{1-\rho_4\rho_5} \tau_4' \rho_3' \right) \frac{1}{1-\rho_4\rho_3} \tau_4 \left(1 + \tau_5 \rho_6 \frac{1}{1-\rho_5\rho_6} \tau_5' \rho_4' \right) \cdot \frac{1}{1-\rho_5\rho_4} \tau_5 \frac{1}{1-\rho_6\rho_5} \tau_6 \right) \quad (16)$$

For each interface j , between two mediums, the reflectivity ρ_j is calculated from the Snell-Descartes laws in function of the refractive indices of the respective mediums and of the incidence angle θ_j on the interface. The refractive index of air is $n_a = 1$ and the one of glass is $n_g = 1.5$. Absorptivity is neglected ($\alpha_i = 0$) except on coated interfaces: $\alpha_2 = \alpha_2'$ and $\alpha_5 = \alpha_5'$. The transmissivity τ_i is then:

$$\tau_j = 1 - \alpha_j - \rho_j \quad (17)$$

The curve of direct transmissivity is plotted on top of measured data in the diagrams of Figure 7. Interestingly, 3-pane glazing have very low transmissivity for angles over 80°. This is not the case for single or double glazing.

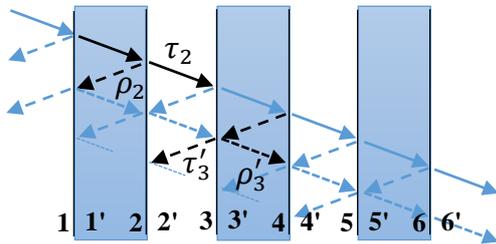


Figure 6: Schema of triple glazing with interfaces 1 to 6 on the front side and 1' to 6' on the back side. The arrows show some of the possible interactions: reflections (ρ) and transmissions (τ)

CALCULATED INTERNAL IRRADIANCE

The model developed enables to calculate the solar irradiance coming inside the building, based on measurements of outside irradiance, coming potentially from local weather monitoring organisation.

The measured internal irradiance values I_{Gi}^{S*} and I_{Gi}^{W*} are compared to the developed model with its parameters. The incoming irradiance inside the building I_{Gi}^S and I_{Gi}^W can be calculated out of the measured irradiances outside: direct normal irradiance I_B^* (pyrheliometer) and global irradiance I_{Go}^* (pyranometer) on the façade:

$$\begin{cases} I_{Gi}^S = \tau_D^S \cdot (I_{Go}^* - \cos \theta^S I_B^*) + \tau_B^S(\theta^S) \cos \theta^S I_B^* \\ I_{Gi}^W = \tau_D^W \cdot (I_{Go}^* - \cos \theta^W I_B^*) + \tau_B^W(\theta^W) \cos \theta^W I_B^* \end{cases} \quad (18)$$

The direct transmittance is obtained from the correlation and applied only for relevant azimuth angles α . The correlation cannot be extrapolated, but it is only used in the range of incidence angles that occur in reality:

$$\begin{cases} I_{Bi}^{S \text{ calc}} = I_{Bo}^S \tau_{Bc}^S(\theta^S) & \text{if } \Phi^S \in [\Phi_{min}^S; \Phi_{max}^S] \\ I_{Bi}^{S \text{ calc}} = 0 & \text{otherwise} \\ I_{Bi}^{W \text{ calc}} = I_{Bo}^W \tau_{Bc}^W(\theta^W) & \text{if } \Phi^W \in [\Phi_{min}^W; \Phi_{max}^W] \\ I_{Bi}^{W \text{ calc}} = 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

The shading from the glazing frame is especially noticeable at the moment when direct irradiance starts to fall on the façade. Shading from the horizon is also noticeable on West façade when the sun elevation falls under 4.5°.

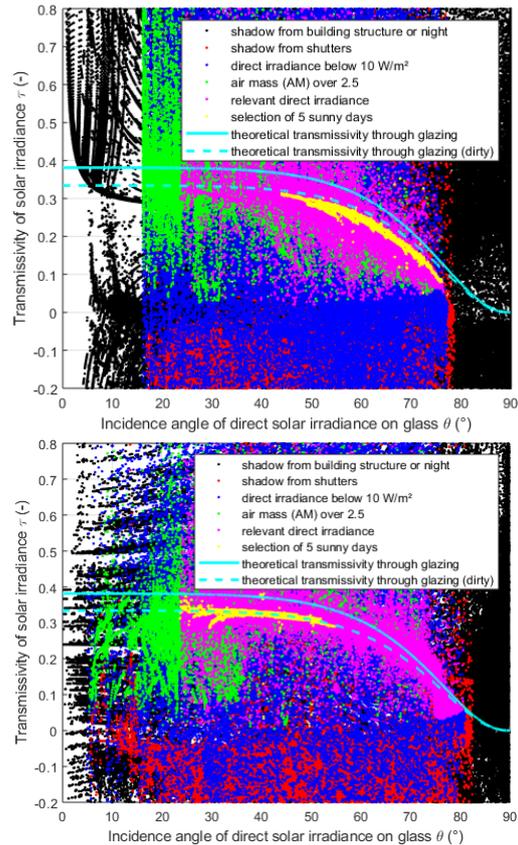


Figure 7: Direct transmittance versus incidence angle: theoretical curve for triple glazing with coatings and measured data on South (top) and West (bottom) facades, including correction for sensor positions and –on West– correction for frame reflection

Figure 8 shows the results obtained from the calculation compared to measurements. The shading from the glazing frame and from the horizon are especially noticeable at the moment when direct irradiance starts or ends to fall on the façade. The reflection on the frame has also an influence on the West façade.

The model is slightly more accurate on the South than on the West as Figure 9 shows: the relative difference of the calculation from the measurement is 0.2% in average on the South, with 13 % standard deviation, and 4.7 % on the West, 15 % standard deviation. The model achieves is a very good fit to measurement data. For the cases it is designed for, the model characterizes the glazed façade radiative behavior out of measurement data.

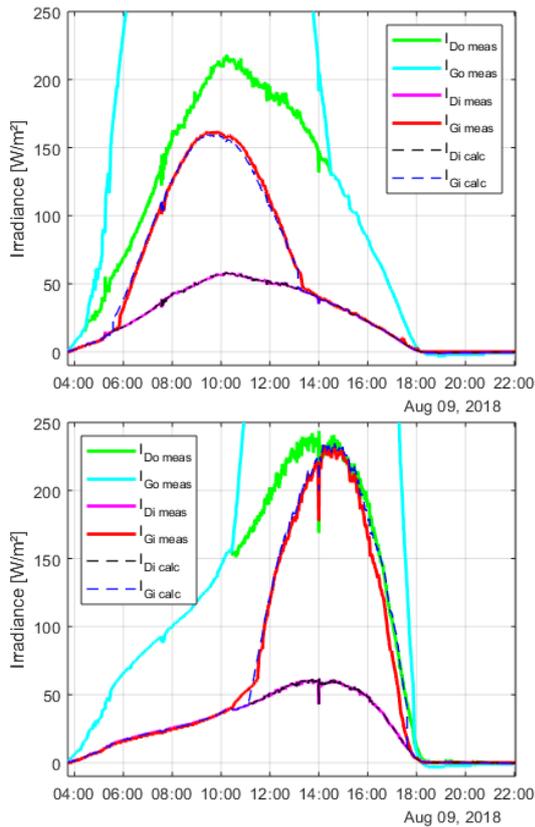


Figure 8: Prediction of inside irradiance (dotted lines) based on outside irradiance, compared to measurement (full lines) on the South (top) and West (bottom) façades.

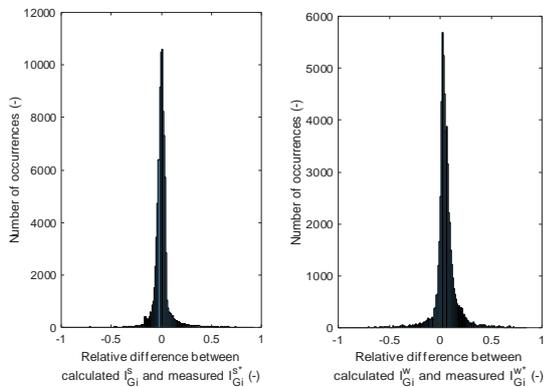


Figure 9: Frequency distribution of relative difference between calculated and measured global internal irradiance on South (left) and West (right) façade

CONCLUSION AND PERSPECTIVE

With a few parameters, the model enables a better understanding of yearly and daily evolutions of the irradiance balance in the building. The parameters can be identified using on-site measurements, with no knowledge of the glazing optical properties. This can be applied to any glazing with isotropic properties. The correction of sensor orientation from measurements can alternatively be used to identify the orientation of the façade from measurements. The

direct solar gains cut-off from horizon shading is also identified from measurements. Taking into account the local effect of the frame on the measured irradiance inside helps to evaluate more accurately the solar gains in the building. The model requires, in a first phase, measurements of irradiance inside the building, which can be performed with low cost sensors. Once calibrated, the model can estimate the inner irradiance from outside measurements only, for example from a local weather station.

For more complex situations, like anisotropic properties or partially opaque shading, a more advanced model will be needed. The model could be extended with a more detailed diffuse sky model and a ground reflectance component. No significant correlation of the diffuse transmissivity with the time of the day has been observed in our case. But it could be interesting to implement diffuse sky models using clearness index and seasonal influence.

In next steps, this model can be integrated in the overall model of the building, including the effect of the shading from the shutters. By identifying and forecasting all heat fluxes in real time, the actual heating and cooling loads can be calculated in a model predictive control.

ACKNOWLEDGEMENT

This work has received funding from the Innovation and Networks Executive Agency (INEA), European Commission H2020 project PVadapt under Grant Agreement number 818342 (www.pvadapt.com).

REFERENCES

- Arasteh, D. K., Kohler, C., & Griffith, B. T. (2009). *Modeling windows in energy plus with simple performance indices*. (DOI: 10.2172/975375).
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., Beckman-Klein-Duffie, & Bekman, U. (2006). *Solar engineering of thermal processes* (3.). Hoboken, NJ: Wiley.
- Laouadi, A., & Parekh, A. (2007). Optical models of complex fenestration systems. *Lighting Research and Technology*, 39, doi:10.1177/1365782806072671
- Maestre, I. R., Molina, J. L., Roos, A., & Coronel, J. F. (2007). *A single-thin-film model for the angle dependent optical properties of coated glazings*
- Martin Zalewski. (2018). *Analyse des wärmetransports durch transparente bauteile - projektstudie*. ()
- Modest Michael, F. (2013). *View factors. Radiative heat transfer* (3rd Edition) Elsevier.
- Roos, A., Polato, P., van Nijnatten, P. A., Hutchins, M. G., Olive, F., & Anderson, C. (2001). *Angular-dependent optical properties of low-e and solar control windows—: Simulations versus measurements*

Rubin, M., Powles, R., & Von Rottkay, K. (1999). *Models for the angle-dependent optical properties of coated glazing materials*

Serale, G., Fiorentini, M., Capozzoli, A., Bernardini, D., & Bemporad, A. (2018). Model Predictive Control (MPC) for Enhancing Building and HVAC System Energy Efficiency: Problem Formulation, Applications and Opportunities. *Energies*, *11*, S. 631. doi:10.3390/en11030631

TRANSPARENT INSULATION MATERIALS IN BUILDING RETROFIT: POTENTIALS FOR TERRASSENHAUSSIEDLUNG GRAZ

A. Eberl¹

¹Institute of Buildings and Energy, TU Graz, Graz, Austria

E-Mail: alexander.eberl@tugraz.at

ABSTRACT

This paper investigates the potential of 3 market available transparent insulation materials (TIM) in building retrofit by the case study of the iconic 1970ies housing estate Terrassenhaussiedlung in Graz, Austria. To achieve this, different façade configurations are modeled in a 2D-simulation environment (HTflux) and tested in a dynamic simulation environment (IESVE) for different orientations and overshadowing situations. The results show that that even low-tech TIM can outperform conventional insulation materials in terms of heating energy demand, when applied to façade areas with high solar exposure, while only transparent aerogel can compete with conventional insulation materials on badly exposed areas.

INTRODUCTION

This paper investigates passive solar retrofit scenarios for the 1970ies housing estate *Terrassenhaussiedlung*, a highly recognized example of late modernist architecture in Graz, Austria. Following the idea of a “megastructure” it consists of a clearly visible primary structure, materialised in exposed concrete, which is contrasted by a secondary structure of lightweight “infills” (see Figure 1).

The hypothesis is of this work is, that TIM could be part of a strategy to modernize the estate in an energy-efficient and at the same time heritage sensitive way: Instead of insulating the entire building envelope, only parts of the façade are modified towards passive solar gains. It is assumed that higher thermal losses, when compared to common insulation measures, can be partially or even fully compensated by solar gains. To verify this hypothesis, different variations of solar façade systems are modelled, tested in a static (HTflux) and a dynamic simulation environment (IESVE) and compared to common insulation measures.

Literature Review

The advantages of TIM and TI-facades have been thoroughly described in the literature. Most literature about this topic was published between the mid-1990ies and mid-2000s in Germany with Fraunhofer ISE in Freiburg and University of Karlsruhe being very active in that field (Wagner 1998, Kerschberger



Figure 1: Terrassenhaussiedlung Graz

et al. 1998., Reiß et al 2005). At present Brno University of Technology in Czech Republic is very active in the research of TIM and solar façades (Čekon et al. 2020, Čekon and Čurpek 2019).

Currently there are 4 types of transparent insulation materials on the market:

1. capillary mats and honeycomb structures
2. polycarbonate sheets
3. Fleeces and fibers
4. Silica Aerogel granulate

All these systems have already been described in the literature more than 20 years ago. In fact, only a small portion of the products and systems described in the early literature (Kerschberger 1998, Wagner 1998, Maiwald 2000, Reiss et al. 2005) are still available. Large competitors like *Sto* and *BASF* have retreated from the market and only a few products survived in the niche of translucent daylighting systems.

Reasons for the bad success of these systems are manifold. As stated by Platzer (1998) there are issues with building regulations, high investment costs, and systems are complicated to size and calculate. This confronts planners an investors financial and legal uncertainties. Other often reported issues are overheating problems, and related comfort issues, even in winter, (Maiwald 2000) as well as overheating related construction damages (Kerschberger 1997).

Despite these known issues, the author of this paper sees potential in TIM, as nowadays simulation methods make it easier to predict the behaviour of solar facades and to tackle associated difficulties.

MATERIALS AND DATA

3 different TIM have been chosen for the study. These materials are currently market available and represent the most common types of TIM.

Material A

Lumira Aerogel La 1000 by *Cabot*, a transparent silica aerogel granulate which is currently used by many different manufacturers to improve thermal properties of daylight elements (see Figure 2). Detailed transmissivity values were available for layer thicknesses of 15, 25 and 60mm (ZAE Bayern 2010). These have been linearly inter- and extrapolated for other thicknesses. It must be noted that this leads to a growing inaccuracy of data with increasing thickness and tendentially underestimated transmissivity values for high thicknesses.

Material C

TIMax CA by *Wacotech*, a capillary mat, made of modified cellulose acetate (see Figure 3). This material is used in solarthermal collectors and currently not certified for construction purposes. It was still chosen for this study because of the comparatively detailed available data: Direct and diffuse solar transmissivity data was available for all investigated thicknesses (Wacotech, no date). Due to the lack of angular-dependent data, diffuse transmissivity values were used in this study. It must be noted that the light transmissivity of capillary mats is highly dependent on the incident angle with significantly more light being transmitted at low incidence angles. Thus, the use of diffuse transmissivity values does most likely lead to an underestimation of solar gains.

Material G

TIMax GL-S by *Wacotech*, a light fabric made of a mixture of glass and synthetic fibre (see Figure 4). This material is currently used exclusively in profiled glazing systems. Optical data was only available for two different setups in the form of a g-value (Wacotech 2019 a, b). All values in this study were linearly extrapolated from these two points, the g-value was assumed to be derived from transmission only ($g=Ts$). Due to the poor data basis, results for this material are to be viewed with reservation.

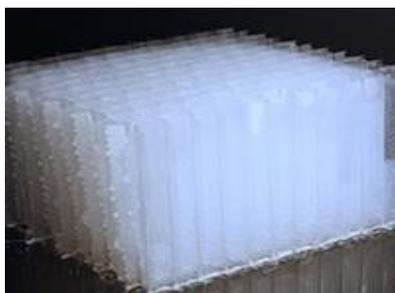


Figure 2: *Lumira Aerogel L1000* (system: *Solera InsolCore*)
(<https://www.advancedglazings.com/products/solera>)

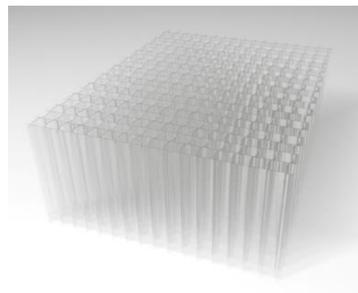


Figure 3: *TIMax CA honeycomb* by *Wacotech*
(<https://www.wacotech.de/sonderanwendung/timax-ca/>)



Figure 4: *TIMax GL fibre* by *Wacotech*
(<https://www.wacotech.de/sonderanwendung/timax-gl-glasgespinst/>)

Table 1: Assumed thermal and optical properties of transparent materials, related to layer thickness.

material	d	λ	τ	ρ	α^{ii}	g
low-iron glass, outside	0.006	1.00	0.81	0.17	0.02	0.82
low-iron glass, inside	0.004	1.00	0.91	0.08	0.01	0.91
A	0.04 ⁱ	0.02	0.69	0.04	0.27	0.82
<i>Cabot Lumira La1000</i>	0.06	0.02	0.53	0.05	0.42	0.73
Silica aerogel granulate	0.08 ⁱ	0.02	0.37	0.06	0.57	0.65
	0.10 ⁱ	0.02	0.21	0.07	0.72	0.56
	0.12 ⁱ	0.02	0.05	0.07	0.88	0.48
C	0.04	0.08	0.72	0.28	0.00	0.72
<i>Wacotech TIMax CA</i>	0.06	0.10	0.70	0.30	0.00	0.70
capillary mat	0.08	0.10	0.67	0.33	0.00	0.67
	0.10	0.10	0.63	0.37	0.00	0.63
	0.12	0.10	0.59	0.41	0.00	0.59
G	0.04 ⁱ	0.10	0.51	0.49	0.00	0.51
<i>Wacotech TIMax GL</i>	0.06 ⁱ	0.10	0.45	0.55	0.00	0.45
glass & sythetic fibre	0.08 ⁱ	0.10	0.40	0.60	0.00	0.40
	0.10 ⁱ	0.10	0.34	0.66	0.00	0.34
	0.12 ⁱ	0.10	0.28	0.72	0.00	0.28
d...dimension [m]		λ ...thermal conductivity [W/mK]				
τ ...transmissivity [-]		ρ ...reflectivity [-]				
α ...absorptivity [-]		g...g-value (EN 410) [-]				
		ⁱ inter- and extrapolated values				
		ⁱⁱ where no detailed data was available, the g-value was assumed to be formed by transmission only ($\alpha=0, \tau=g$)				

An overview of thermal and optical properties of all transparent materials defined in the simulations can be seen in Table 1. Note that transmissivity values for outer glass panes have been reduced by the factor of 0.9 and the reflectivity increased accordingly to account for polluted surfaces.

Design variants

For the translucent walls, a mullion-transom steel construction was proposed. The TIM is held between two glass panes (low-iron glass), forming a translucent wall. These wall panels are clamped to a steel sub construction and sealed with EPDM (ethylene propylene diene monomer rubber). To minimize thermal losses, the glass panes are separated by thermally improved spacers (silicone foam). Mullions are assumed to be 60mm wide and spaced 600mm apart, making up for a frame ratio of 10%.

For TIM layers up to 60mm the supporting structure was placed behind the translucent wall elements, for higher thicknesses, the steel structure was partly indented into the insulation layer. This was proposed to keep the total construction dimension below 160mm – the diameter of the existing wall system.

Figure shows representative horizontal wall sections of the proposed construction variants. Note that these are design proposals by the author and do not represent recommendations by the suppliers of the TIM.

All proposed wall systems were simulated as translucent walls without thermal mass and as translucent insulation systems in combination with a solar absorbing thermal mass layer (fibre reinforced concrete panels). The proposed thermal mass absorber is separated from the translucent wall by an air gap of 30mm (see Figure 6). This gap can be ventilated to reduce cooling loads and thermal stress on the façade in summer. A maximum solar absorption is achieved by an absorptive coating ($\alpha=0.95$).

To investigate the influence of thermal mass, 3 different thermal mass layers were simulated in combination with the previously proposed translucent wall systems. Physical properties of the proposed thermal mass layers are listed in Table 2.

In total, 5 different variations of translucent wall systems (TIM-layers of 40, 60, 80, 100 and 120 mm) were combined with 4 variations of thermal mass layers (no thermal mass and thermal mass layers of 20, 40 and 80 mm). These combinations were simulated with the 3 previously described TIM which makes a total of 60 design variants.

SIMULATION APPROACH

The simulations aim to estimate the thermal performance of passive solar walls in the climatic context of Graz and the topographical context of Terrassenhaussiedlung under standard conditions of residential use. The simulations focus on heating demands and their possible reduction, overheating and related cooling demands were not addressed at this stage. To avoid situations, where heating and demands alternate and thus the shading strategy becomes a main energy factor, simulations were only carried out for the 4 coldest months of the year (November 1 – February 28).

Thermal bridging

In a first step, the effect of linear thermal bridges between translucent wall panels and their subconstruction was evaluated with the thermal simulation software *HTFlux*, which is validated in accordance with the standards EN ISO 10077-2:2007 and EN ISO 10211-2:2012 (HTflux Engineering GmbH, n.d.). Representative horizontal wall sections of all proposed design variants were built up as shown in Figure 5 with the thermal properties of the 3 proposed TIM to calculate the total thermal resistance R_{total} of the proposed design variants. Punctual thermal bridges (screws) were not considered in the calculation.

Table 2: Properties of thermal mass absorbers

material	Suf.	d	λ	R	ρ	c	c_{eff}
air gap		0.03	0.18	0.17	1.2	1003	-
absorptive coating			$\alpha=0.95, \epsilon=0.9$				
thermal mass M2	M2	0.02	2.00	0.01	2200	1000	12.2
fibre reinforced concrete M4	M4	0.04	2.00	0.02	2200	1000	24.4
concrete M8	M8	0.08	2.00	0.04	2200	1000	48.9
d...dimension [m]			ρ ...bulk density [kg/m ³]				
λ ...thermal conductivity [W/mK]							
R...thermal resistance [m ² K/W]							
c...heat capacity [J/kgK]			α ...absorptivity [-]				
c_{eff} ... $c*\rho*d/3600$ [Wh/m ² K]			ϵ ...emissivity [-]				
Suf...Suffix in the naming scheme							

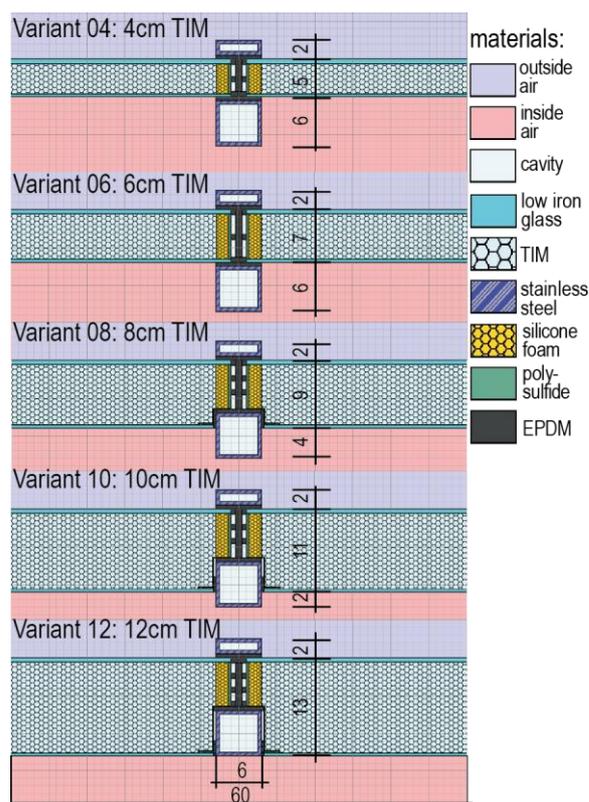


Figure 5: Construction variants of translucent variants:

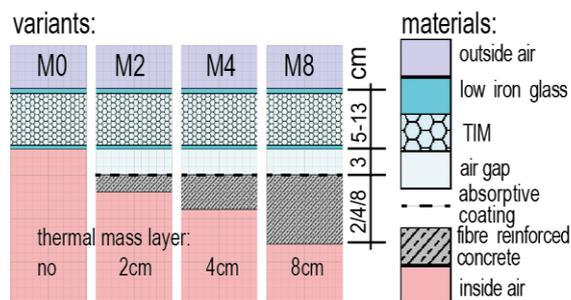


Figure 6: Construction variants of thermal mass

Dynamic simulation

These transferred into a dynamic simulation environment (IESVE). IESVE is validated under ASHRAE standard 140: 2014 and ISO 52000 series of standards (IES, n.d.). Dynamic simulations were carried out in a Level 2 simulation as classified by Eijndems & Poel (1991) and Van Dijk et al. (1991): the

optical properties of the TIM were modelled as a window in front of a mass wall. IESVE's simulation engine calculates optical data at 10-degree intervals and tracks sun rays through transparent elements over multiple reflections and therefore allows a relatively precise modelling of passive solar design strategies (IESVE Help Centre, n.d.).

Representation of constructions

Translucent walls were built up as windows with three panes. While the outer panes represent the actual glass panes, the inner pane represents the thermal and optical properties of the TIM. Thermal resistance of cavities between the glazing layers were set to a minimum. This approach allowed it to transfer the calculated thermal resistances and solar transmissivity values directly into the simulation model. 10% of the wall area were assumed as frame. As the user interface of IESVE the does not allow to specify thermal bridges separately, all thermal bridges were factored into the thermal resistance of the frame R_f (reduction of the resistance to match the overall thermal resistance). Results of these calculations are listed in Table 3.

Geometric representation

All design variants were tested in a simple room model which represents a typical outer zone of an apartment. While variants without absorber walls were modelled as single-zone models, variants with absorber walls were modelled as 2-zone models: A slim unconditioned outer zone, representing the cavity between the translucent wall and the absorber wall, and a conditioned inner zone, representing the actual room (see Figure 7). These two zones are separated by an interior wall with high solar absorptivity ($\alpha=0.95$). The thermal resistance of the unconditioned air gap between the absorber and the glazing is defined by the heat transfer resistances between the air and its enclosing surfaces. This resistance has been set to 0.09 $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ for both enclosing surfaces to represent a thermal resistance of 0.18 $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ (30mm air gap with horizontal air flow, as defined in ISO 6946:2017).

To evaluate the heat flux through the façade, the translucent wall systems were set up on one side of the room, while all other surfaces were set as adiabatic ($U=0.0 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$). In this representation the translucent façade system covers 100% of the thermally active building envelope.

To account for the topographical context of the site, several instances of the representative room were oriented towards the main orientations of the building complex (South-East and North-West) and placed in a context of simplified shading geometry. These rooms were then offset at different heights to represent 5 different overshading situations 0°, 10°, 20°, 30° and 40° (see Figure 8). As can be seen in Figure 7, local shading geometry (protruding façade elements) was also considered in the model.

Table 3: Thermal properties of translucent walls

Pref.	d_{total}	frame	R_g	R_f	R_{total}	g	g_{eff}
A TIM: Lumira La1000 aerogel							
A-40	0.05	0.10	2.01	0.20	1.30	0.63	0.57
A-60	0.07	0.10	3.01	0.32	1.88	0.58	0.52
A-80	0.09	0.10	4.01	0.30	2.18	0.52	0.46
A-100	0.11	0.10	5.01	0.31	2.45	0.46	0.41
A-120	0.13	0.10	6.01	0.32	2.69	0.40	0.36
C TIM: TiMax CA honeycomb							
C-40	0.05	0.10	0.50	0.22	0.45	0.58	0.52
C-60	0.07	0.10	0.61	0.33	0.57	0.57	0.51
C-80	0.09	0.10	0.81	0.30	0.71	0.54	0.49
C-100	0.11	0.10	1.01	0.29	0.85	0.52	0.47
C-120	0.13	0.10	1.21	0.29	0.98	0.49	0.44
G TIM: TiMax GL fibre							
G-40	0.05	0.10	0.41	0.21	0.38	0.43	0.39
G-60	0.07	0.10	0.61	0.33	0.57	0.39	0.35
G-80	0.09	0.10	0.81	0.30	0.71	0.35	0.31
G-100	0.11	0.10	1.01	0.29	0.85	0.30	0.27
G-120	0.13	0.10	1.21	0.29	0.98	0.25	0.23

d_{total} ...total wall thickness [m] frame: frame portion [-]
 R_{total} ...thermal resistance, total section [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]
 R_g ...thermal resistance, glazing [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]
 R_f ...thermal resistance, frame [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]
 g ...g-value (EN 410) [-] $g_{\text{eff}} \dots g \cdot 0.9$ [-]
 Pref...Prefix in the naming scheme

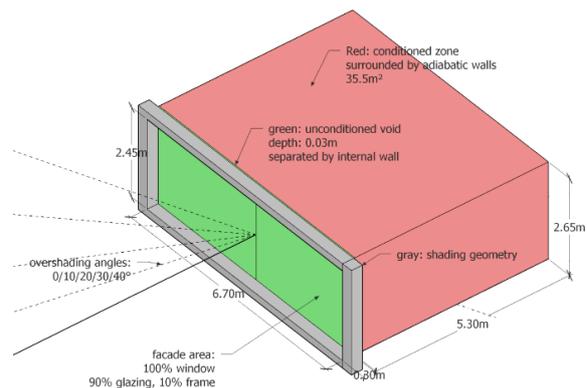


Figure 7: Graphic representation of a representative room, consisting of two zones to represent the double layered façade.

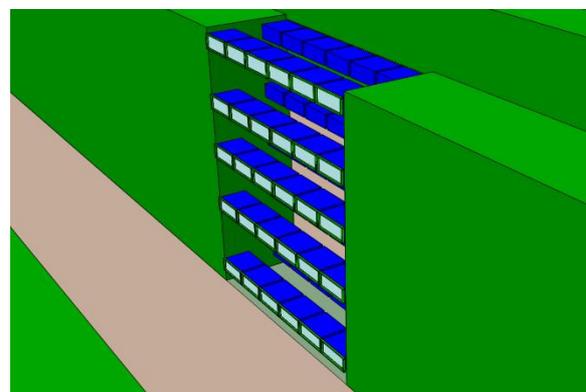


Figure 8: Geometry of the simulation scene, showing a series of identical rooms, representing 5 different overshading situations for the main orientations of the building complex.

Boundary conditions

The following climate data was used for the simulations: Test reference year for the location of Graz, Austria, provided by ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik). Location: 15°26'52" East, 47°04'47" North, 366m above sea level.

Internal air temperature, Internal loads and air exchanges were set according to the Austrian standard ÖNORM B8110-5: 2019 (see Table 4). As Austrian standards do not provide data for dynamic building simulations, internal loads were modulated according to the Swiss standard SIA 2024:2015, which provides such data. Detailed schedules are shown in Figure 9.

RESULTS

For better understanding of the thermal performance of the proposed design variants, results are represented by two different values: the equivalent conductance of the wall U_{eq} [W/m²K] and the mean heating load of the room Q_m [W/m²].

U_{eq} is derived by dividing the net heat balance of solar gains Q_s and gains/losses through the wall Q_w by the concurrent temperature difference between inside and outside ($T_i - T_e$) for each simulated hour. Divided by the number of simulated hours n and the façade area A_f one derives a value that describes the average thermal performance of a construction element for a specific period.

$$U_{eq} = \frac{\sum_0^n \frac{Q_s + Q_w}{T_i - T_e}}{n \cdot A_f} \quad (1)$$

For opaque constructions, this value corresponds very well to the calculated U-values as heat flows are mainly driven by thermal conduction. For translucent constructions, this value is highly affected by solar gains and can be negative over certain periods of time, which stands for a heat flow from outside to inside.

U_{eq} does not give a full understanding of the energy performance of a façade, as it does not differentiate between useful gains and gains that merely lead to an interior temperature above the heating set point. Therefore, these results have been contrasted to the mean heating load Q_m which refers to the usable floor area (UFA) of the simulated room.

Figure 10 to Figure 15 show an overview of the simulation results, grouped by TIM. Solid lines stand for variants without thermal mass, dashed lines for results with the highest thermal mass. Not all results are shown in the graphs for better readability. To visualize the effect of solar gains, all design variants were also calculated as opaque elements without solar gains (g -value=0). These results are marked as $g=0$. For better orientation, all simulation results have been set in relation to simulation results for light-weight opaque walls, which are represented as dashed, blue lines. For example, the line $U0.3$ represents the simulation result for an opaque light-weight wall with a U-value of 0.3 W/m²K. $U0.0$ stands for the

Table 4: interior climate conditions for conditioned zones

zones		
Heating set point	22	°C
Cooling set point	26	°C
occupancy gains	1.46	W/m ² UFA
equipment & lighting gains	2.6	W/m ² UFA
ventilation	0.37	ach/h
infiltration	0.11	ach/h
UFA...Usable Floor Area	ach/h...	air changes per hour

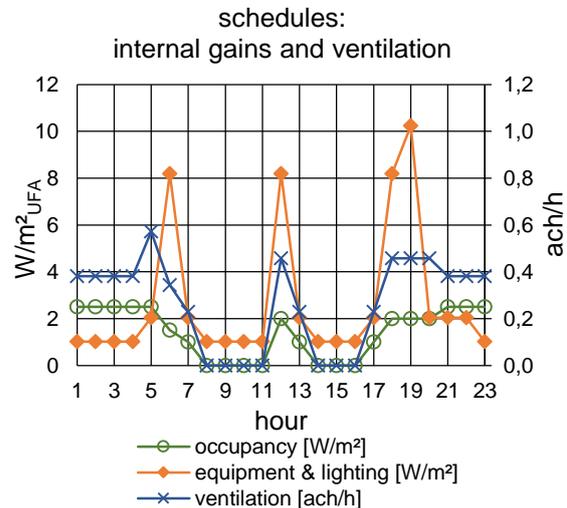


Figure 9: Schedule for occupancy gains used in the simulation

simulation results of a room with no conduction losses, meaning that all heating loads can be attributed to air exchanges. A detailed list of all simulation inputs and outputs is given in Table 5.

DISCUSSION AND CONCLUSION

The results show that TIM can reach higher thermal standards than any standard insulation materials on well exposed orientations. Even a simple system, as the honeycomb structure *TIMAX CA* can reach positive equivalent U-values and heating loads that are close to a U-value of 0 W/m²K or less (see Figure 13). This is remarkable as this material has been calculated with g -values for diffuse radiation. Since the sun comes at very low angles during the simulated periods and the material shows significantly higher solar transmissivity at such angles, it is very likely, that solar gains have been underestimated.

Influence of U-value and g -value.

For most materials, a lower U-value results in a lower heating load. This effect is most pronounced at orientations with low solar exposure but prevails on all orientations and overshadowing angles. Seemingly the related decrease of thermal losses outweighs the decrease of solar gains.

A slight exception is the case of the aerogel walls, that show the lowest heating load at 80 mm layer thickness (variants A-08) and an overshadowing angle of 0° or 10° (see Figure 11). It seems like in these orientations a “sweet spot” between solar gains and thermal losses could be reached. It must be noted though, that the solar transmissivity values for layer thicknesses higher

than 60mm were linearly extrapolated from measured data and could have been underestimated.

Influence of orientation and overshadowing

As could be expected, the thermal performance of translucent walls is highly dependent on solar exposure. While SE-oriented walls may reach negative equivalent U-values, NW-oriented walls mostly do not reach a thermal performance that can compare to nowadays thermal insulation standards for opaque walls.

The only exceptions are the variants with transparent aerogel (A-04-MX to A-12-MX): even the worst tested orientations perform similar to an undisturbed opaque construction with the same insulation material. This seems obvious but is still remarkable since the total U-value of the simulated aerogel facades is considerably higher than that of an undisturbed construction due to thermal bridges between frame and glazing (see Table 6).

Influence of thermal mass

More thermal mass in the absorber wall leads to better energy performance. The higher the insolation and the higher the U-value of the translucent wall, the more pronounced this effect is. On orientations that receive little solar gains, this effect prevails but can be mostly attributed to the slightly better U-values of the constructions.

Figure 16 shows the effect of thermal mass layers on design variants C-04 to C-12 (TIM: TiMax CA) for the best orientation (SE, 00°). To be able to distinguish between the influence of solar gains and the influence of the mass layer alone, the results are contrasted to the same constructions without solar gains (g=0).

While the transparent variants show a decrease of heating load with increasing absorber mass, the variants without solar gains only show a significant decrease when a thermal mass layer is added, but no substantial decrease when the thermal mass increases. This initial decrease can be mostly attributed to the additional thermal resistance of the air gap of the air gap between the glazing and the thermal mass.

Outlook

Further simulations are necessary, to test how translucent walls perform in the context of other constructions and construction related thermal bridges. More detailed data, in particular angle-dependent transmissivity values will be needed to receive more founded results. A critical issue that must be addressed is the summer and transition period and related overheating problems. Also practical issues such as costs, noise protection and fire protection must also be taken into account, before final recommendations can be made.

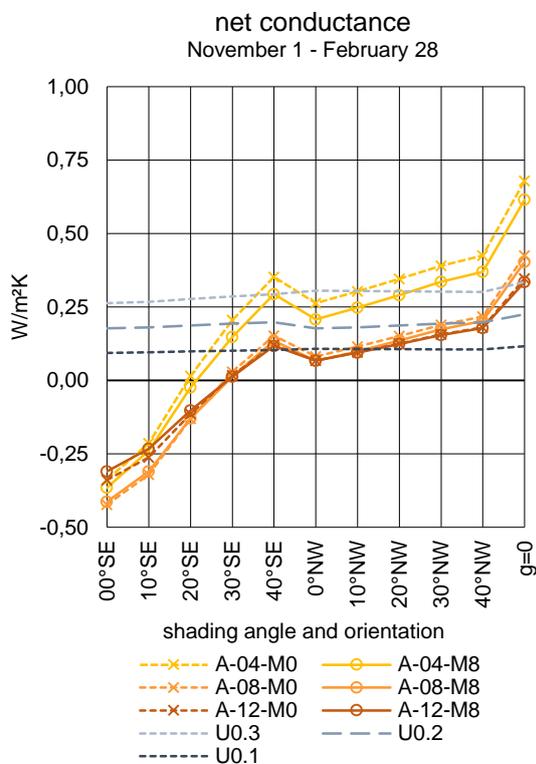


Figure 10: Net conductance in relation to orientation and shading angle for design variants A-04-M0 to A-12-M8

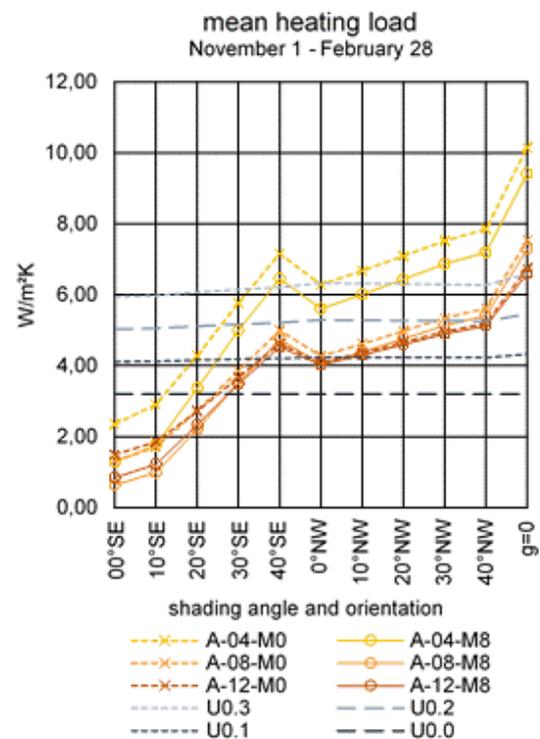


Figure 11: Mean heating load per UFA in relation to orientation and shading angle for design variants A-04-M0 to A-12-M8

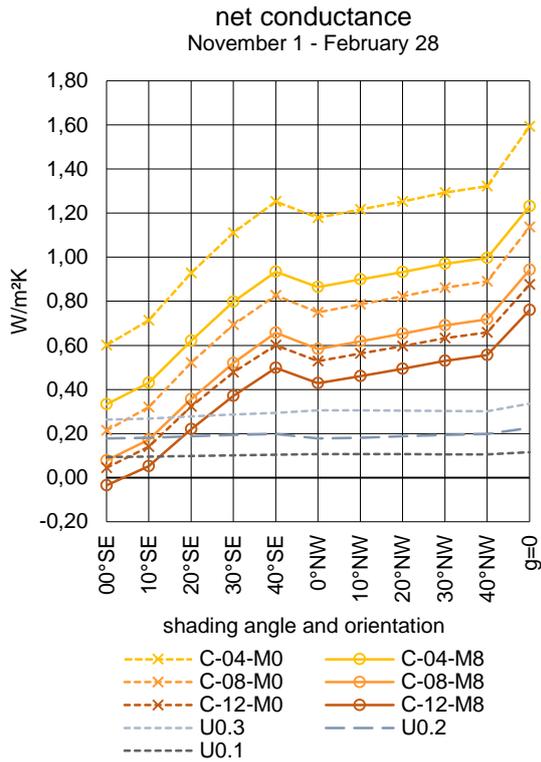


Figure 12: Net conductance in relation to orientation and shading angle for design variants C-04-M0 to C-12-M8

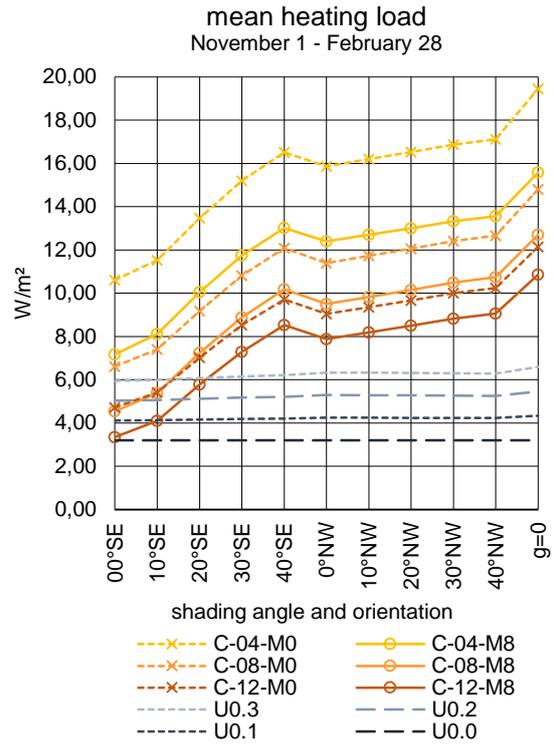


Figure 13: Mean heating load per UFA in relation to orientation and shading angle for design variants C-04-M0 to C-12-M8

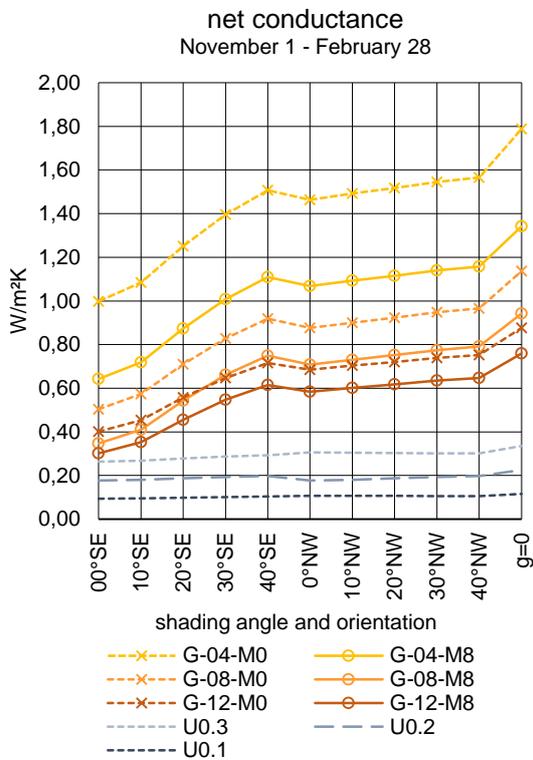


Figure 14: Net conductance in relation to orientation and shading angle for design variants G-04-M0 to G-12-M8

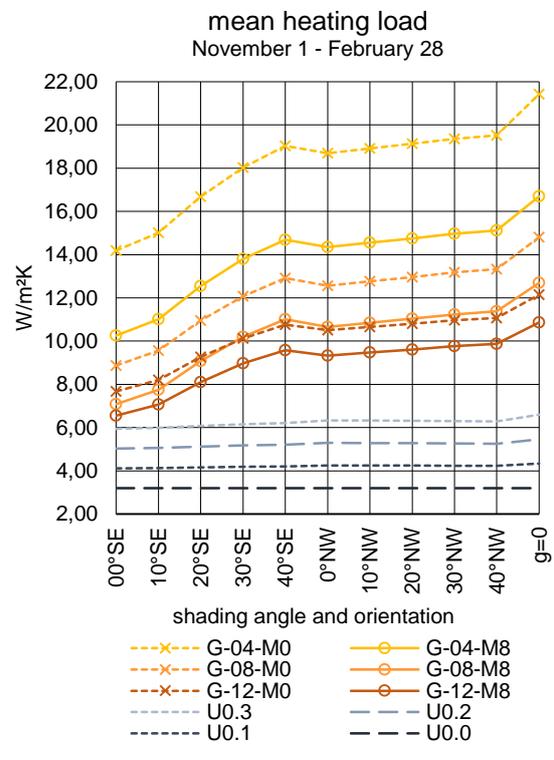


Figure 15: Mean heating load per UFA in relation to orientation and shading angle for design variants G-04-M0 to G-12-M8

Table 5: Simulation inputs and outputs for all design variants (rotate left)

simulation inputs				simulation outputs - nat.1. U _{ext} [W/m ² /K]						simulation outputs - nat.2. Q _{ext} [W/m ² /h]																	
variant	d _{vert} [m]	R _{ext} [m ² /K]	U _{ext} [W/m ² /K]	g _{ext} [-]	SE orientation	NW orientation	0°	30°	40°	0°	30°	40°	SE orientation	NW orientation	0°	30°	40°	0°									
A-04-M0	0.05	1.30	0.68	0.57	0.0	-0.34	-0.21	0.02	0.21	0.35	0.26	0.30	0.35	0.39	0.43	0.68	2.4	2.9	4.3	5.8	7.2	6.3	6.7	7.1	7.5	7.9	8.2
A-04-M2	0.10	1.48	0.61	0.57	12.2	-0.37	-0.25	-0.03	0.16	0.31	0.22	0.26	0.30	0.34	0.37	0.62	2.5	3.0	4.2	5.4	6.7	5.8	6.2	6.6	7.0	7.3	9.5
A-04-M4	0.12	1.49	0.60	0.57	24.4	-0.39	-0.26	-0.03	0.15	0.30	0.21	0.25	0.29	0.34	0.37	0.62	1.7	2.2	3.6	5.1	6.5	5.6	6.0	6.4	6.9	7.3	9.4
A-04-M8	0.16	1.51	0.60	0.57	48.9	-0.37	-0.24	-0.02	0.15	0.29	0.21	0.25	0.29	0.34	0.37	0.62	1.3	1.8	3.4	5.1	6.5	5.6	6.0	6.4	6.9	7.3	9.4
A-06-M0	0.07	1.88	0.49	0.52	0.0	-0.44	-0.33	-0.12	0.06	0.19	0.11	0.15	0.19	0.23	0.26	0.49	1.4	1.8	2.9	4.2	5.4	4.6	5.0	5.4	5.8	6.1	8.2
A-06-M2	0.12	2.06	0.45	0.52	12.2	-0.45	-0.34	-0.14	0.04	0.17	0.09	0.13	0.17	0.20	0.24	0.46	1.5	2.0	3.0	4.1	5.2	4.4	4.7	5.1	5.5	5.8	7.9
A-06-M4	0.14	2.07	0.45	0.52	24.4	-0.47	-0.35	-0.14	0.03	0.16	0.08	0.12	0.16	0.20	0.23	0.46	1.0	1.3	2.5	3.8	5.1	4.3	4.7	5.1	5.5	5.8	7.9
A-06-M8	0.18	2.09	0.44	0.52	48.9	-0.45	-0.33	-0.13	0.03	0.16	0.08	0.12	0.16	0.20	0.23	0.46	0.7	1.0	2.3	3.7	5.0	4.2	4.6	5.0	5.4	5.7	7.8
A-08-M0	0.09	2.18	0.43	0.46	0.0	-0.42	-0.32	-0.13	0.03	0.15	0.08	0.12	0.15	0.19	0.22	0.43	1.3	1.7	2.7	3.9	5.0	4.3	4.6	5.0	5.3	5.6	7.5
A-08-M2	0.14	2.36	0.40	0.46	12.2	-0.41	-0.32	-0.13	0.02	0.14	0.07	0.11	0.14	0.18	0.21	0.40	1.4	1.8	2.8	3.8	4.9	4.2	4.5	4.9	5.2	5.5	7.3
A-08-M4	0.16	2.37	0.39	0.46	24.4	-0.43	-0.32	-0.13	0.02	0.14	0.07	0.10	0.14	0.17	0.20	0.40	0.9	1.2	2.3	3.6	4.8	4.1	4.4	4.8	5.2	5.5	7.3
A-08-M8	0.20	2.39	0.39	0.46	48.9	-0.41	-0.31	-0.13	0.01	0.13	0.07	0.10	0.14	0.17	0.20	0.40	0.6	1.0	2.2	3.5	4.7	4.1	4.4	4.8	5.2	5.5	7.3
A-10-M0	0.11	2.45	0.38	0.41	0.0	-0.38	-0.29	-0.12	0.02	0.13	0.07	0.10	0.13	0.17	0.19	0.38	1.4	1.7	2.7	3.7	4.8	4.1	4.4	4.8	5.1	5.4	7.1
A-10-M2	0.16	2.63	0.36	0.41	12.2	-0.36	-0.28	-0.12	0.02	0.13	0.07	0.10	0.13	0.16	0.19	0.37	1.4	1.8	2.7	3.7	4.7	4.1	4.4	4.7	5.0	5.3	6.9
A-10-M4	0.18	2.64	0.36	0.41	24.4	-0.38	-0.28	-0.12	0.02	0.12	0.07	0.09	0.13	0.16	0.19	0.36	0.9	1.3	2.4	3.6	4.6	4.1	4.4	4.7	5.0	5.3	6.9
A-10-M8	0.22	2.66	0.35	0.41	48.9	-0.36	-0.27	-0.12	0.01	0.12	0.06	0.09	0.13	0.16	0.19	0.36	0.7	1.1	2.2	3.5	4.6	4.0	4.3	4.6	5.0	5.3	6.9
A-12-M0	0.13	2.69	0.35	0.36	0.0	-0.34	-0.26	-0.11	0.02	0.12	0.07	0.10	0.13	0.16	0.18	0.35	1.5	1.9	2.7	3.7	4.6	4.1	4.4	4.7	5.0	5.2	6.7
A-12-M2	0.18	2.87	0.33	0.36	12.2	-0.31	-0.24	-0.10	0.02	0.12	0.07	0.10	0.13	0.16	0.18	0.34	1.5	1.9	2.7	3.7	4.6	4.1	4.4	4.7	5.0	5.2	6.6
A-12-M4	0.20	2.88	0.33	0.36	24.4	-0.32	-0.24	-0.10	0.02	0.12	0.07	0.10	0.13	0.16	0.18	0.34	1.0	1.4	2.4	3.6	4.6	4.1	4.3	4.6	4.9	5.2	6.6
A-12-M8	0.24	2.90	0.33	0.36	48.9	-0.31	-0.23	-0.10	0.01	0.12	0.07	0.10	0.13	0.16	0.18	0.34	0.8	1.2	2.3	3.5	4.5	4.0	4.3	4.6	4.9	5.1	6.6
C-04-M0	0.05	0.45	1.61	0.52	0.0	0.60	0.71	0.93	1.11	1.25	1.18	1.22	1.25	1.29	1.32	1.50	10.6	11.5	13.5	15.2	16.5	15.9	16.2	16.5	16.9	17.1	18.4
C-04-M2	0.10	0.63	1.25	0.52	12.2	0.37	0.47	0.66	0.83	0.96	0.88	0.92	0.95	0.99	1.02	1.26	8.7	9.4	10.9	12.3	13.4	12.8	13.1	13.4	13.7	13.9	16.0
C-04-M4	0.12	0.64	1.23	0.52	24.4	0.34	0.45	0.64	0.81	0.94	0.87	0.91	0.94	0.98	1.01	1.25	7.2	8.5	10.1	12.0	13.0	12.6	12.9	13.2	13.6	13.8	15.9
C-04-M8	0.16	0.66	1.20	0.52	48.9	0.33	0.43	0.62	0.80	0.93	0.86	0.90	0.93	0.97	1.00	1.23	7.2	8.5	10.1	11.7	13.0	12.4	12.7	13.0	13.3	13.6	15.6
C-06-M0	0.07	0.57	1.35	0.51	0.0	0.38	0.49	0.70	0.88	1.02	0.94	0.98	1.02	1.06	1.09	1.35	8.4	9.2	11.1	12.8	14.1	13.4	13.8	14.1	14.5	14.7	17.0
C-06-M2	0.12	0.75	1.09	0.51	12.2	0.21	0.32	0.51	0.68	0.80	0.73	0.76	0.83	0.86	1.00	7.2	7.9	9.3	10.7	11.8	11.1	11.5	11.8	12.1	12.4	14.5	
C-06-M4	0.14	0.76	1.08	0.51	24.4	0.19	0.30	0.49	0.66	0.79	0.72	0.75	0.79	0.83	0.85	1.00	6.2	7.0	8.8	10.4	11.7	11.0	11.4	11.7	12.0	12.3	14.3
C-06-M8	0.18	0.78	1.05	0.51	48.9	0.19	0.29	0.48	0.65	0.79	0.71	0.75	0.78	0.82	0.85	1.08	5.7	6.6	8.5	10.2	11.5	10.9	11.2	11.5	11.8	12.1	14.1
C-08-M0	0.09	0.71	1.13	0.49	0.0	0.21	0.32	0.52	0.69	0.83	0.75	0.79	0.82	0.86	0.89	1.34	6.6	7.4	9.2	10.8	12.1	11.4	11.7	12.1	12.4	12.7	14.8
C-08-M2	0.14	0.89	0.94	0.49	12.2	0.09	0.19	0.38	0.55	0.67	0.59	0.63	0.66	0.70	0.73	0.96	6.0	6.6	8.0	9.3	10.4	9.7	10.0	10.3	10.6	10.9	13.0
C-08-M4	0.16	0.90	0.93	0.49	24.4	0.08	0.18	0.37	0.53	0.66	0.56	0.62	0.66	0.69	0.72	0.95	5.0	5.7	7.5	9.1	10.3	9.6	10.0	10.3	10.6	10.9	12.9
C-08-M8	0.20	0.92	0.91	0.49	48.9	0.08	0.17	0.36	0.52	0.66	0.58	0.62	0.65	0.69	0.73	0.94	4.5	5.4	7.2	8.9	10.2	9.5	9.8	10.1	10.3	10.7	12.7
C-10-M0	0.11	0.85	0.98	0.47	0.0	0.11	0.21	0.40	0.57	0.69	0.62	0.66	0.69	0.73	0.76	0.99	5.5	6.2	7.9	9.5	10.7	10.0	10.3	10.7	11.0	11.3	13.3
C-10-M2	0.16	1.03	0.83	0.47	12.2	0.02	0.12	0.20	0.46	0.58	0.50	0.54	0.57	0.60	0.63	0.85	5.1	5.7	7.1	8.3	9.4	8.8	9.1	9.4	9.7	9.9	11.9
C-10-M4	0.18	1.04	0.83	0.47	24.4	0.00	0.10	0.29	0.44	0.57	0.49	0.53	0.56	0.60	0.63	0.85	4.2	4.9	6.6	8.1	9.3	8.7	9.0	9.3	9.6	9.9	11.8
C-10-M8	0.22	1.06	0.81	0.47	48.9	0.01	0.10	0.28	0.43	0.57	0.49	0.53	0.56	0.60	0.63	0.84	3.8	4.6	6.4	8.0	9.2	8.6	8.9	9.2	9.5	9.8	11.7
C-12-M0	0.13	0.98	0.87	0.44	0.0	0.04	0.14	0.32	0.48	0.60	0.53	0.56	0.60	0.63	0.66	0.88	4.7	5.4	7.0	8.5	9.7	9.0	9.4	9.7	10.0	10.2	12.1
C-12-M2	0.18	1.16	0.75	0.44	12.2	-0.03	0.06	0.24	0.39	0.51	0.44	0.47	0.50	0.53	0.56	0.77	4.5	5.1	6.4	7.6	8.7	8.0	8.3	8.6	9.0	9.2	11.0
C-12-M4	0.20	1.17	0.75	0.44	24.4	-0.04	0.05	0.23	0.38	0.50	0.43	0.46	0.49	0.53	0.56	0.76	3.7	4.3	6.0	7.4	8.6	8.0	8.3	8.6	8.9	9.1	11.0
C-12-M8	0.24	1.19	0.73	0.44	48.9	-0.03	0.05	0.22	0.37	0.50	0.43	0.46	0.49	0.53	0.56	0.76	3.3	4.1	5.8	7.3	8.5	7.9	8.2	8.5	8.8	9.1	10.9
G-04-M0	0.05	0.38	1.81	0.39	0.0	1.00	1.08	1.25	1.40	1.51	1.46	1.49	1.52	1.55	1.57	1.79	14.2	15.0	16.7	18.0	19.0	18.7	18.9	19.1	19.4	19.5	21.4
G-04-M2	0.10	0.56	1.37	0.39	12.2	0.69	0.77	0.91	1.04	1.14	1.09	1.12	1.14	1.17	1.18	1.38	11.2	11.8	13.1	14.3	15.2	14.8	15.0	15.2	15.4	15.6	17.2
G-04-M4	0.12	0.57	1.35	0.39	24.4	0.67	0.74	0.89	1.02	1.12	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.37	10.6	11.4	12.9	14.1	15.0	14.6	14.9	15.1	15.3	15.4	17.0
G-04-M8	0.16	0.59	1.31	0.39	48.9	0.64	0.72	0.87	1.01	1.11	1.07	1.09	1.12	1.14	1.16	1.34	10.3	11.0	12.5	13.8	14.7	14.3	14.6	14.8	15.0	15.1	16.7
G-06-M0	0.07	0.57	1.35	0.35	0.0	0.64	0.72	0.87	1.00	1.10	1.06	1.08	1.11	1.14	1.16	1.35	10.4	11.1	12.7	13.9	14.9	14.5	14.7	14.9	15.1	15.3	17.0
G-06-M2	0.12	0.75	1.09	0.35	12.2	0.46	0.54	0.67	0.79	0.88	0.84	0.86	0.88	0.91	0.93	1.30	8.7	9.3	10.6	11.7	12.5	12.1	12.3	12.6	12.8	12.9	14.5
G-06-M4	0.14	0.76	1.08	0.35	24.4	0.44	0.51	0.65	0.78	0.87	0.83	0.85	0.88	0.90	0.92	1.08	8.3	9.0	10.4	11.5	12.4	12.0	12.2	12.5	12.7	12.8	14.3
G-06-M8	0.18	0.78	1.05	0.35	48.9	0.43	0.50	0.64	0.77	0.87	0.82	0.85	0.88														

Table 6: Comparison of U-values and mean heating energy demands for transparent aerogel facades and ideal opaque facades with the same insulation properties.

transparent aerogel (NW, 40°)			opaque aerogel		
variant	U_{total}	Q_m	d	U	Q_m
A-04-0	0.68	15.71	40	0.46	15.66
A-06-0	0.49	12.16	60	0.31	12.77
A-08-0	0.43	11.25	80	0.24	11.26
A-10-0	0.38	10.72	100	0.19	10.33
A-12-0	0.35	10.39	120	0.16	9.69

U_{total} ...overall heat transfer coefficient (U-value) [W/m^2K]

U_{total} ...U-value, including thermal bridges [W/m^2K]

d...dimension [m] Q_m ... mean heating load [W/m^2UFA]

REFERENCES

- Čekon M., Čurpek, J., Slávik, R., Šikula, O. 2020. Coupled transparent insulation system with low emissivity solar absorber: An experimentally validated building energy simulation study. *Science and Technology for the Built Environment*, vol. 26, no. 1, p. 1-13. <https://doi.org/10.1080/23744731.2020.1715250>
- Čekon M.; Čurpek J. 2019. A transparent insulation façade enhanced with a selective absorber: a cooling energy load and validated building energy performance prediction model. *Energy and Buildings* Vol 183. p. 266-282. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.032>
- Eijdemans H., Poel A. 1991. Modelling of TIM walls on four levels of detail, Proc. Transparent Insulation Technology Conf. TI4, Birmingham UK.
- HTflux Engineering GmbH, n.d. HTflux official webpage, URL: <http://www.htflux.com> (accessed 07.07.2020).
- Integrated Environmental Solutions (IES) n.d. Software Validation, URL: <https://www.iesve.com/software/software-validation> (accessed 07.07.2020).
- Integrated Environmental Solutions (IES) Help Centre n.d. ApacheSim Calculation Methods, URL: https://help.iesve.com/ve2018/apachesim_calculation_methods.htm (accessed 07.07.2020).
- Kerschberger, A., Platzer, W., Weidlich, B. 1998. *Transparente Wärmedämmung. Produkte, Projekte, Planungshinweise*, Bauverlag, Wiesbaden/Berlin Germany.
- Maiwald, R. (2000): *Die transparente Wärmedämmung im Spannungsfeld Komfort-Energie und Leistungstest an einer transparenten Wärmeämmung aus einer Isolierverglasung*, PhD thesis, Universität Karlsruhe Germany.

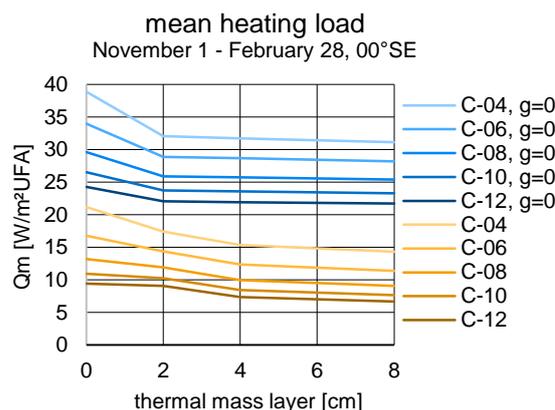


Figure 6: Design variants C-04 to C-12, in comparison to the same wall constructions without solar gains ($g=0$).

- Platzer, W. 1998. *Advances and Problems of Transparent Insulation in the market. Professionalization and Diversification*. EuroSun 98, The Second ISES Europe Solar Congress, Portorož, Slovenia, September 14 - 17, 1998.
- Reiss, J., Wenning, M., Ehorn, H. Rouvel, L. 2005. *Solare Fassadensysteme. Energetische Effizienz – Kosten – Wirtschaftlichkeit*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart Germany.
- Van Dijk, H. A. L., Oersloot, H. O., Bakker L. G. 1991. Thermal-optical modelling of translucent insulation materials – different levels of accuracy, different applications, Proc. Transparent Insulation Technology Conf. TI4, Birmingham UK.
- Wacotech (no date). TIMax CA Wabenstruktur, Bauphysikalische Daten, URL: <https://www.wacotech.de/sonderanwendung/timax-ca/> (accessed 18.04.2020).
- Wacotech 2019a. Datenblatt, System Ug 0.8, URL: https://www.wacotech.de/wp-content/uploads/2019/04/Datenblatt_System08_2019.pdf (accessed 18.04.2020).
- Wacotech 2019b. Datenblatt, TWD im zweischaligen Profilglas Standardaufbau, URL: https://www.wacotech.de/wp-content/uploads/2019/04/Datenblatt_zweischalig-Standardaufbau_2019.pdf (accessed 18.04.2020).
- Wagner, A. 1998. *Transparente Wärmedämmung an Gebäuden*, Verlag TÜV Rheinland, Cologne, Germany.
- ZAE Bayern (Bavarian Center for Applied Energy Research) 2010. Measurement of the transmittance and reflectance of Nanogel samples, commissioned by Cabot GmbH. Report ZAE2-0410-02 (2010), unpublished report.

VENTILATION PERFORMANCE AND ENERGY ASSESSMENT OF A HIGH-RISE RESIDENTIAL BUILDING - A CASE STUDY IN MALAYSIA

L. Elgheriani¹, B. Cody¹ and K. Shavarebi²

¹Institut für Gebäude und Energie, TU Graz, Graz, Austria

²International University of Malaya-Wales, Malaysia

E-Mail: lobna.arch@gmail.com, brian.cody@tugraz.at

ABSTRACT

Kuala Lumpur, Malaysia's capital, nestles the majority of high-rise buildings in the country, and nearly half are residential. Such buildings are designed predominantly to be naturally ventilated, yet occupants rely mostly on mechanical ventilation. This pilot study assessed ventilation strategies in oppositely oriented units of a high-rise residential building in Kuala Lumpur. The study combined experimental and simulation methods. The simulation analysis was performed using IES_VE simulation tool in two parts, commencing with a calibration procedure, followed by a ventilation strategies analysis. The result concluded that the indoor air temperature of field and simulated data compares well with a positive correlation coefficient. Further annual simulation validated mixed-mode ventilation as an optimal ventilation strategy to achieve potential energy savings without foregoing occupants' thermal comfort.

INTRODUCTION

The building sector is one of the most significant carbon emissions contributors in the world (IPCC, 2019). In Malaysia's case, the carbon emissions from this particular sector have been doubled in the last decades, representing now 25% of the total country's emissions (Lucon et al., 2014). Kuala Lumpur accommodates 81.5% of the total number of high-rise buildings in Malaysia, and half of these buildings are residential buildings (CTBUH, 2018). Given this statistic, measures to reduce cooling loads, as well as enhancing the indoor thermal performance, are proposed in the Malaysian Standard Energy Efficiency and Use of Renewable Energy (MS 2680:2017). The code of practice gives guidance on the design, selection of materials, and efficient use of energy in residential buildings.

Objective One: Base-line Model Calibration

According to the literature, Integrated Environmental Solution (IES_VE) software is a powerful commercial tool that shown its reliability and correspondence between collected field measurements and simulation results. Previous research stated that the calibration of site measurement data with the base-line model offers the possibility to introduce ultimate

solutions for environmental studies concluding a positive correlation coefficient ranging between 70 and 90% (Liu, et al., 2018), (Christensen, et al., 2015), (Almhafdy, et al., 2013) and (Leng, et al., 2012).

Prior to the ventilation strategy analysis, a calibration procedure was performed to ensure the simulation results are valid. The discrepancy percentage between the field and simulation data was evaluated, concluding a correlation coefficient. In this study, the ambient air temperature parameter only was used to calibrate. To estimate the correlation between the investigated variable and the simulation results, a Pearson coefficient of correlation formula was used.

Objective Two: Optimal Ventilation Strategy

Various studies investigating different ventilation strategies' impact on the thermal or/and energy performance in high-rise residential buildings are summarized in Table 1.

Table 1:

Summary of previous ventilation performance studies

VENTILATION STRATEGY	INVESTIGATION METHOD	REF.
Natural	Simulation	Zhou, et al., 2014
Natural	Field measurement	Aflaki et al., 2016
Natural Mixed-mode	Simulation/Field measurement	Wong & Li, 2007
Natural Mixed-mode	Simulation/Field measurement	Omrani, et al., 2017
Natural Mechanical	Simulation	Prajongsan & Sharples, 2012
Natural Mechanical	Simulation	Priyadarsini et al., 2004
Mechanical	Simulation	Fahmi et al., 2018

It can be concluded that numerous past performance studies have investigated one or combined ventilation strategies. Quantitative research combining natural, mechanical, and mixed-mode strategies, utilizing both field measurements and simulation methods, is still scarce. This study combines both investigation methods while examining natural, mechanical, and mixed-mode ventilation strategies.

Thermal comfort

MS 2680:2017 includes an adaptive thermal comfort equation (2) for naturally ventilated or non-air-conditioned residential buildings. The MS 2680:2017 equation seems to be adapted from ASHRAE Standard 55 (ASHRAE, 2010), however employing different constants.

$$T_c = 13.8 + 0.57 * T_o \quad (1)$$

$$T_c = 17.6 + 0.31 * T_o \quad (2)$$

T_c = Indoor temperature (°C); T_o = Mean monthly outdoor temperature (°C).

Humphreys (1976) and Nicol and Roaf (1996) proposed an earlier adaptive model, where the developed model regulates the comfort zone in the psychometric chart by determining neutrality temperature, using the equation (2) to indicate the center point for the comfort zone. Auliciems and de Dear revised the relations for predicting group neutralities based on mean indoor and outdoor temperatures and proposed the current equation applied by the ASHRAE Standard 55 (ASHRAE, 2010). The equation states that the indoor temperature for human thermal comfort (T_c) is dependent on the outdoor ambient (T_o). The adaptive thermal comfort desired indoor temperature ranges within ± 2 °C of the neutrality temperature (T_c) (Szokolay, 1991).

The practicality and applicability of the thermal adaptive equation mentioned in MS 2680:2017 code of practice were examined in the study and compared to the one in ASHRAE Standard 55.

Cooling Load

The MS 2680:2017 proposes a guide on the recommended capacity of air conditioners dependable on various room sizes. The practicality of applying the recommended cooling capacity of 110 w/m² was evaluated and compared with the provided air conditioning cooling capacity in the tested units.

The paper eventually explores different ventilation strategies with the aid of simulation models that prioritize efficient cooling load within an acceptable thermal comfort range.

METHODOLOGY

The chosen building for this pilot study is a high-rise residential building nestled in the city center of Kuala Lumpur, consisting of 500 units split over two towers, as shown in Figure 1. While the residence is built with means to maximize natural lighting and ventilation, yet it features a high window-to-wall ratio (WWR), which imposes the worst problems regarding thermal environments in the tropics. The development obtained as well a Green Building Index (GBI) Gold certification. Although being awarded a golden GBI certificate, this fact must be considered as available

literature shows that outcome and drivers of most green building certifications are diverse (Scofield, 2009) and (Matisoff, et al., 2014). For instance, to enhance the marketability and profitability of the certified buildings.

Quantitative research methodology is the approach for this study as it is experimental and technical research—Figure 1 displays the methodology flow chart.

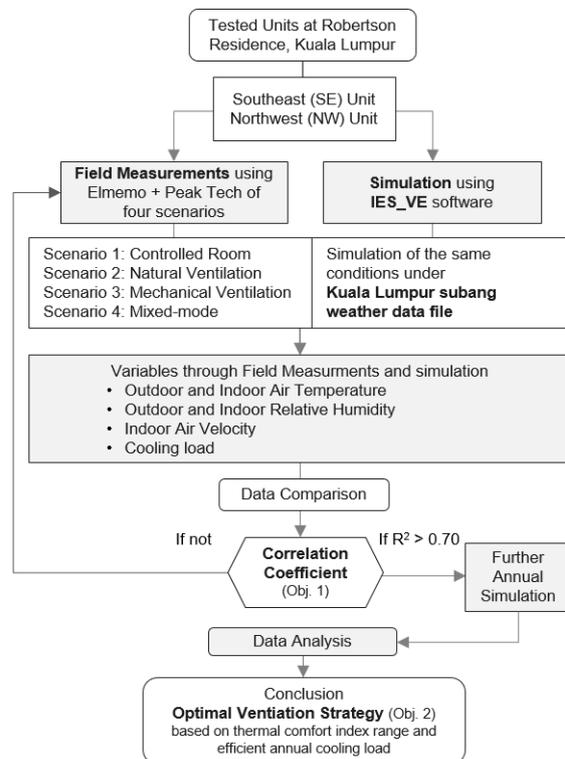


Figure 1: Methodology flowchart

A continuous measurement was undertaken in both units included ten minutes' intervals monitoring of the air temperature, relative humidity, and air velocity, using the data loggers, i.e., ELMEMO and PeakTech. The field investigations were performed in two oppositely oriented one-bedroom units (area: 64 m², floor-to-ceiling height: 3 m) located on the 19th floor (South tower: 38 floors and North tower: 36 floors), as shown in Figure 2.

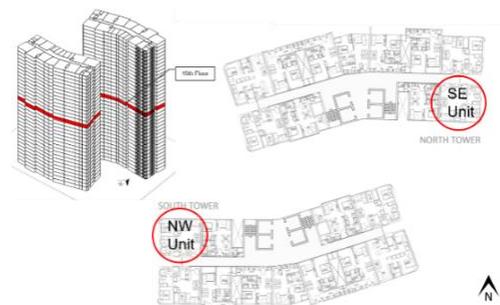


Figure 2: Selected experimental units and high-rise building layout plan

The two corner units are facing respectively southeast (SE) and northwest (NW). The units' external walls feature 50% WWR with a glazing area of 11.8 m². The openable window area of 3.1 m² are awning windows, and the remaining are fixed windows.

Moreover, the units accommodate two single split air-conditioning units with a cooling capacity of 5.33 kW; hence, a total of 10.66 kW. Following the MS 2680:2017 code of practice, the guide, however, recommends a total cooling capacity of 6.05 kW.

The monitoring equipment indicated in Table 2 was installed accordingly to the guideline mentioned in the ASHRAE Standard 55. For the indoor investigation, air temperature sensor, humidity sensor, and air velocity anemometer were set up at 1.1 m above the floor in the center of each room, as indicated in Figure 3. For the outdoor investigation, an outdoor weather station was set up on an external sled to collect micro-climate data.

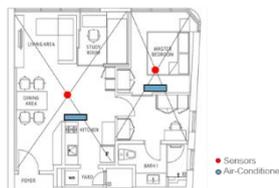


Figure 3: Installation of monitoring equipment in the experimental units

The investigation period was conducted between 10-19 February 2020. During the 24-hour investigation, the occupancy characteristic was defined under the following four scenarios:

- Scenario 1: 24-hour without ventilation, all windows closed. (Controlled room)
- Scenario 2: 24-hour with natural ventilation, all windows opened.
- Scenario 3: 12-hour (6:00 am to 6:00 pm) without ventilation (all windows closed). During the night-time (6:00 pm to 6:00 am) with an air conditioning system utilized.
- Scenario 4: 12-hour (6:00 am to 6:00 pm) with natural ventilation (all windows opened). During the night-time, 12-hour (6:00 pm to 6:00 am) with an air conditioning system utilized.

IES_VE simulation tool was chosen to simulate the units under the ASHRAE design weather file for Subang/Kuala Lumpur which is already linked to the software. The software assimilates various third-party application programs by integrated collection

function. ModelIT was used for the preprocessing of the high-rise model, SunCast for solar shading analysis, and the APACHE component performs a thermal calculation based on the designated weather file. The construction materials indicated in Table 3 were applied to the model. In addition, internal gains of one occupant, appliances, lighting, and infiltration rate of 0.5 ACH were set to the simulation model.

Table 2:
Monitoring Equipment

PARAMETER	SPECIFICATION	ACCURACY/RESOLUTION
AHLBORN + ELMEMO		
Temperature	Thermocouple NTC Typ N	-20...100°C: ±0.4K
Relative Humidity	Capacitive humidity sensor	0.5...98 % ±0.3k
PEAK TECH 5185		
Temperature	Thermocouple NTC Typ K	-40°C...125°C: ±0.3K
Relative Humidity	Capacitive humidity sensor	0.0%...100% ±0.3k
Vane-Anemometer	Vane sensor	0.1...30.00 m/s; ±1.0%

Table 3:
Material properties of building element

ELEMENT	CONSTRUCTIONS	U-VALUE (W/m ² K)
External wall	Shear concrete + Monocouche render	3.235
Internal wall	Cement brick wall	2.126
Glazing (Aluminum framing)	Single laminated Low-E (6.38-0.76-6.38mm)	3.834
	Including framing Total shading coefficient	4.541 0.38
Ceiling/flooring	Porcelain tile finish + Reinforced concrete + suspended Plasterboard ceiling	1.036

The cooling profile was defined annually from January to December, taking 24-26 °C as setpoints, the cooling capacity of 5.33 kW, and per the occupancy schedule profile displayed in Figure 4.

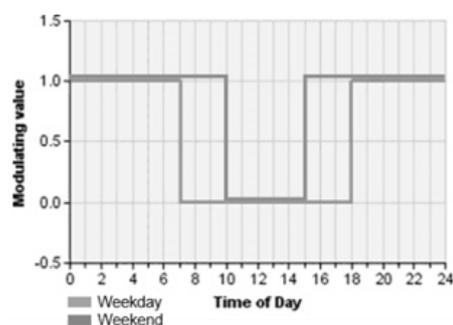


Figure 4: Occupancy Schedule Profile

RESULTS AND DISCUSSION

Base-line Model Calibration

A comparative analysis between the field measurement readings and the simulation results for the varied scenarios as labeled is illustrated in Figure 5. In general, the results showed that the differences between field-measured indoor air temperature (AvgTi) and simulation results are satisfactory and mostly share similar patterns. In the case of AvgTi, the discrepancy percentage varied between 0.97-4.07%, respectively. While the percentage difference of the average outdoor temperature (AvgTo) tended to be

higher, varying between 1.12-8.65%. This difference is because the IES_VE weather data for Subang/Kuala Lumpur was found to be slightly lower than that of the micro-climate data collected.

The relative humidity curve reflected a typical hot-humid climate condition whereby the RH gradually escalates towards night-time and drops during the day. The correlation, however, between the measured average outdoor relative humidity (RHo) and indoor relative humidity (RH_i) with simulation results was relatively low, especially on 13 and 19 February. This may be attributed to the precipitation that occurred on the days of the field data collection.



Figure 5: Summary of field measurements and simulation results

Figure 6 presents the relationship between the simulated indoor air temperature results and the collected field measurement as a scatter plot. As displayed, a positive correlation coefficient of ($R^2=0.84$) was observed when comparing the simulated indoor air temperature and field measurements. This attribute to the validity and reliability of IES_VE to generate further annual simulations models to conduct further analysis of the proposed ventilation strategies.

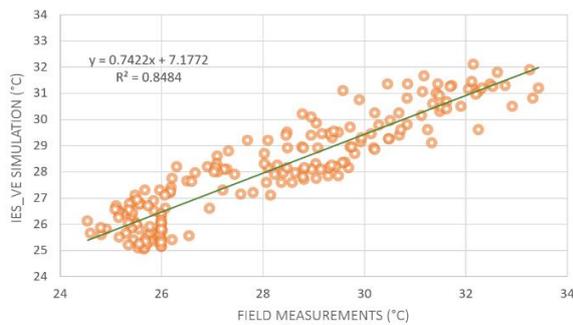


Figure 6: Scatter plot, the correlation coefficient between field-measured indoor air temperature and IES_VE simulation results

Moreover, Figure 7 displays the annual cooling load between the air conditioner provided cooling capacity and IES_VE simulation results. A percentage difference of 9% reflects the reliability of IES_VE software to be used for annual cooling simulations.

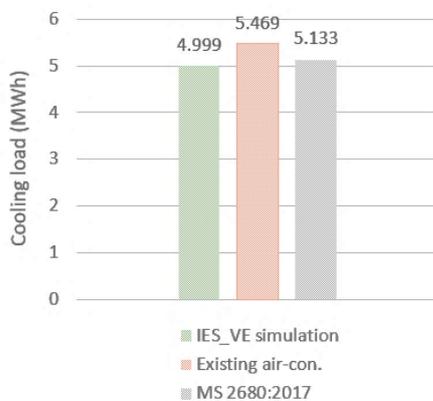


Figure 7: Annual cooling demand

Optimal Ventilation Strategy

Thermal Comfort

For a better understanding of the neutral temperature behavior, an hourly mean indoor and outdoor air temperature of the simulation results for February are aggregated in Figure 8. A comparative illustration of the MS 2680:2017 and ASHRAE adaptive thermal comfort equation curves is presented below. The indoor air temperature where natural ventilation is applied; scenarios 2 and 4 are notably out of the thermal comfort range of the MS:2680:2017 curve and slightly closer to the ASHRAE one, especially during

the night-time. In contrast, during the day-time, especially between 10:00 and 16:00, the indoor air temperature tended to be closer to the MS 2680:2017 comfort zone; however, only for a range of six hours.

The illustrated evaluation demonstrates the inapplicability of the adaptive thermal comfort equation mentioned in the MS 2680:2017 in this study since the thermal comfort satisfactory range is limited to certain hours of the day.

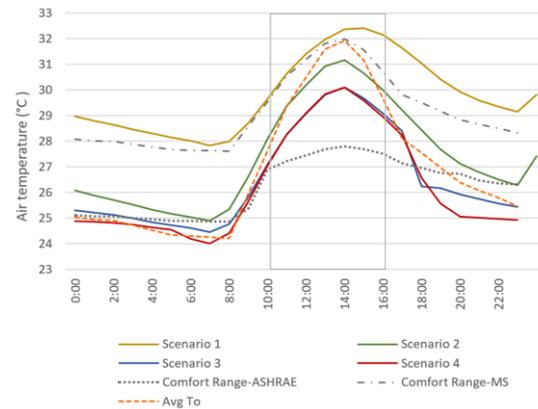


Figure 8: Mean indoor/outdoor air temperature and comfort zone range

Cooling load

As mentioned earlier, the MS:2680:2017 recommends a cooling capacity of 110 w/m². As shown in Figure 7, a reduced annual cooling demand of 5.133 MWh was observed when following the guideline of MS:2680:2017. Based on annual simulated thermal analysis, Table 4 shows the impact of recommended MS:2680:2017 and provided cooling capacities on the indoor air temperature in terms of hours in the range of 24-26 °C. The differences seemed to be trivial. However, the cooling capacity provided in the units, correspondingly, increase the annual cooling demand unnecessarily by 6%.

Table 4:

Annual indoor air temperature in hour ranges

COOLING CAPACITY (KWH)	AIR TEMPERATURE (°C) – HOURS IN RANGE	
	>24.00 to <=26.00	
MS Standard	3.025	2172
Existing air-con	5.33	2190

Furthermore, over the considered field measurement period, it is difficult to estimate an optimal ventilation strategy as the field measurement duration seems insufficient for a credible estimation. Annual ventilation analysis using simulation results was conducted. Indoor air temperatures between 24.8 °C and 28.0 °C were taken as a lower and upper limit of thermal comfort derived from the ASHRAE Standard 55 thermal adaptive equation. As shown in Figures 9-10, the 24-hour ventilation (scenario 2) resulted in

longer hours of cooler conditions than those without ventilation exhibited in scenario 1.

Scenarios 1 and 3 experienced longer hours of high indoor air temperature. Thus, imposing the worst indoor air temperature conditions, namely because of the high solar heat gain and the lack of ventilation. Whereas, scenario 3 experienced slightly lower temperatures than Scenario 1. This was concluded, namely due to the overnight mechanical cooling.

In contrast, natural ventilation showed high effectiveness on the indoor air temperature reduction (scenarios 2 and 4). This was due to the heat loss occurred faster than the condition without natural ventilation. However, only 24-hour natural ventilation might not be able to provide a comfortable thermal environment; hence the relative humidity percentage tends to be higher, ranging between 70-80%, as presented in scenarios 2 and 4 in Figures 9-10.

The percentage of discomfort hours indicates when a natural ventilation system was utilized, the need for active cooling or mechanical ventilation is essential. Thus, scenario 4 (mixed-mode ventilation) is concluded to provide a balanced indoor thermal comfort in terms of both indoor air temperature and relative humidity percentage.

Figure 11 presents the simulated annual cooling loads of the tested units. As illustrated, the SE unit generally experiences higher annual cooling loads in both scenarios 3 and 4 than the NW unit. This was due to the amount of incident solar radiation projected on the south façade throughout the year.



Figure 11: Orientation impact on the annual cooling load

Scenario 4, however, experienced lower cooling loads by 16-19% than scenario 3. This was highly caused by the natural heat loss occurring through natural ventilation and an increase of thermal energy absorbed in internal surfaces in the case without ventilation. Though, other load factors must be studied further for increased validity.

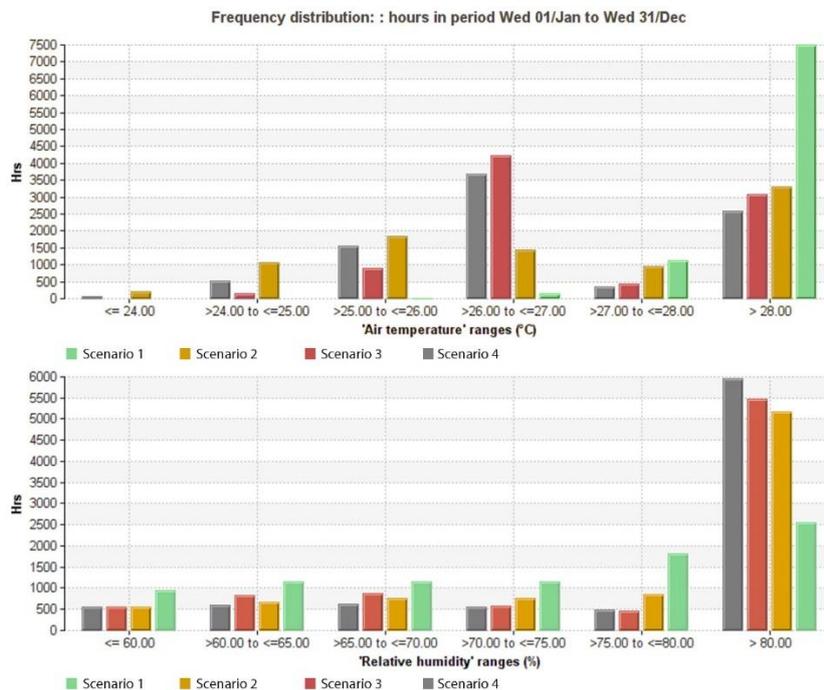


Figure 9: Simulated annual indoor air temperature and relative humidity in hour ranges of NW unit

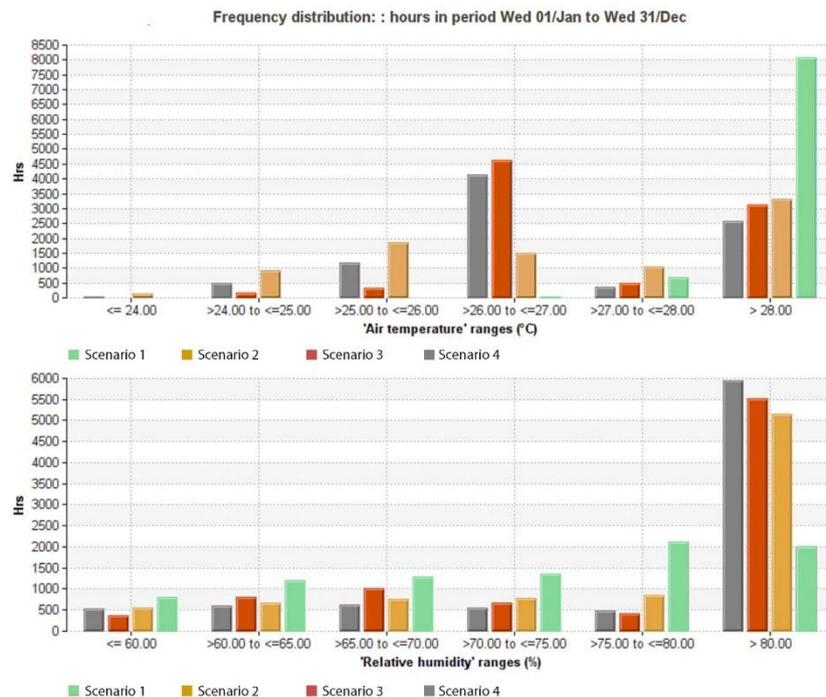


Figure 10: Simulated annual indoor air temperature and relative humidity in hour ranges of SE unit

CONCLUSION

Using a quantitative methodology approach, this paper combined experimental and technical research using IES_VE as a simulation tool. A calibration procedure was performed to compare the field measurements with the simulation results to validate the software. The comparison between the field measurements and simulation results showed a positive correlation coefficient of ($R^2=0.84$). Hence, indicating the potential of IES_VE simulation software as a useful tool to evaluate the environmental performance.

The study also aimed to analyze the thermal and energy performance of a high-rise residential building located in Kuala Lumpur, Malaysia. The unit conditions were chosen based on the occupancy characteristics towards the use of natural, mechanical, and mixed-mode ventilation. An annual simulation was carried out using IES_VE software, concluding mixed-mode ventilation (scenario 4) anticipated energy-saving potential reducing the cooling load between 15-19% (depending on the orientation) when compared with mechanical ventilation (scenario 3).

Designing energy-efficient buildings involves the use of effective thermal comfort models. Major international standards can be modified to incorporate specific climate regions for better applicability. The analysis presented draws upon the importance of revising the MS 2680:2017 adaptive thermal comfort equation. Consequently, this would result in better thermal and energy performance in the residential building sector.

Lastly, the significance of the results reported is limited as the results are based on the selected experimental model building configuration, and thus, it is difficult to generalize the conclusions. Nevertheless, the framework could be extended to similar climatic regions and potential high-rise residential buildings with similar settings and configurations.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to acknowledge the partial financial support provided by Technische Universität Graz for this research. They would also like to thank AWAarchitect for the assistance provided.

REFERENCES

- Aflaki, A., Mahyuddin, N., & Baharum, M. R. 2016. "The influence of single-sided ventilation towards the indoor thermal performance of high-rise residential building: A field study." *Energy and Buildings*.
- Almhafdy, Abdulbasit, Norhati Ibrahim, Sabarinah Sh Ahmad, and Josmin Yahya. 2013. "Courtyard Design Variants and Microclimate Performance." *AMER AicQoL. Procedia and behavior sciences*.
- ASHRAE. 2010. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers standard 55 pp. 13-15.*

- Christensen, Jørgen Erik, Kleanthis Chasapis, Libor Gazovic, Jakub Kolarik, and Jakub Kolarik. 2015. "Indoor Environment and Energy Consumption Optimization Using Field Measurements and Building Energy Simulation." *Energy Procedia*.
- CTBUH. 2018. The Skyscraper Center: The Global Tall Building Database, <http://skyscrapercenter.com/compare-data>
- Fahmi, M. R., Defiana, I., & Antaryama, I. G. N. (2018). "Cross Ventilation in High-Rise Apartment Building : Effect of Ventilation Shaft Aperture Configuration on Air Velocity and Air Flow Distribution." *IPTEK Journal of Perocedings Series*.
- Humphreys, MA. 1976. Comfortable indoor temperatures related to the outdoor air temperature. *Building Service Engineer*.
- IPCC. 2019. IPCC Climate Change. United Nations.
- Leng, P., bin Ahmad, M. H., Ossen, D. R., & Hamid, M. 2012. "Investigation of Integrated Environmental Solutions-Virtual Environment Software Accuracy for Air Temperature and Relative Humidity of the Test Room Simulations." *The International Annual Symposium on Sustainability Science and Management*.
- Liu, Zhijian, Di Wu, Hancheng Yu, Wensheng Ma, and Guangya Jin. 2018. "Field measurement and numerical simulation of combined solar heating operation modes for domestic buildings based on the Qinghai-Tibetan plateau case." *Energy & Buildings*.
- Lucon, O., D, et al. 2014. Buildings. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press.
- Matisoff, D.C., D.S. Noonan, and A.M. Mazzolini. 2014. "Performance or marketing benefits? The case of LEED certification." *Environmental Science Technology*.
- MS 2680. 2017. Malaysian Standard Energy efficiency and use of renewal energy for residential buildings (MS 2680:2017) – code of practice. Department of Standards Malaysia.
- Newsham, G.R., S. Mancini, and B.J Birt. 2009. "Do LEED-certified buildings save energy? Yes, but." *Energy & Buildings*.
- Nicol, F., and S. Roaf. 1996. Pioneering new indoor temperature standard: the Pakistan project. *Energy and Buildings*.
- Omrani, S., Garcia-hansen, V., Capra, B., & Drogemuller, R. 2017. "On the effect of provision of balconies on natural ventilation and thermal comfort in high-rise residential buildings." *Building and Environment*.
- Prajongsan, P., & Sharples, S. 2012. "Enhancing natural ventilation, thermal comfort and energy savings in high-rise residential buildings in Bangkok through the use of ventilation shafts." *Building and Environment*.
- Priyadarsini, R., Cheong, K. W., & Wong, N. H. 2004. "Enhancement of natural ventilation in high-rise residential buildings using stack system." *Energy and Buildings*.
- Scofield, J.H. 2009. "Do LEED-certified buildings save energy? Not really." *Energy Build*.
- Szokolay, SV. 1991. Heating and cooling of buildings: Handbook of architectural technology. Van Nostrand Reinhold
- Wong, N. H., & Li, S. 2007. "A study of the effectiveness of passive climate control in naturally ventilated residential buildings in Singapore." *Building and Environment*.
- Zhou, C., et al. 2014. "Design optimization and field demonstration of natural ventilation for high-rise residential buildings." *Energy & Buildings*.

II: Modellierung und Simulation auf Gebäude- und Bauteilebene

PERFORMANCEOPTIMIERUNG HYGROTHERMISCHER 3D-SIMULATIONEN DURCH PARAMETEROPTIMIERUNG ITERATIVER GLEICHUNGSSYSTEMLÖSER

A. Nicolai¹ und U. Ruisinger¹

¹Institut für Bauklimatik, TU Dresden, Dresden, Deutschland

E-Mail: andreas.nicolai@tu-dresden.de

KURZFASSUNG

Trotz stetig steigender Rechenleistung moderner Computerhardware kann eine instationäre, dreidimensionale, hygrothermische Simulation immer noch ein langwieriger Vorgang sein. Um die Dauer einer Simulation zu reduzieren, stehen Nutzern verschiedene Einflussmöglichkeiten offen, deren Auswirkungen jedoch nur schwer bzw. aufwändig abzuschätzen sind. Der Artikel analysiert anhand zweier Fallbeispiele verschiedene Möglichkeiten, die Simulationszeiten zu reduzieren. Beginnend mit einer Gittersensitivitätsstudie wird die Skalierung des Aufwandes für verschiedene direkte und iterative Gleichungssystemlöser diskutiert. Weiterhin werden numerische Parameter wie Konvergenzfaktoren und Iterationsgrenzen untersucht. Basierend auf integrierten Laufzeitmessungen und Statistiken für verschiedenen Komponenten des Rechenkerns werden die iterativen Lösungsverfahren GMRES und BiCGStab in Kombination mit einem ILU Vorkonditionier betrachtet. Die Untersuchungen werden anhand der Software DELPHIN 6 durchgeführt. Der Artikel schließt mit einer Empfehlung für eine günstige Ausgangswahl an Algorithmen und Parametern in Abhängigkeit der Systemgröße und einer kompakten Methodik, diese anhand der Solverstatistiken weiter zu optimieren.

Despite continuously enhanced computer hardware, running dynamic 3D hygrothermal simulations may still be a time-consuming process. The duration of simulations may be reduced by user-selected numeric parameters. However, the actual impact of parameters like maximum Krylow subspace, convergence coefficients etc. proves difficult to estimate. In the article different methods of reducing simulation speed are applied to two example cases. Starting with a grid sensitivity study the scaling of effort for different direct and iterative linear equation system solvers is discussed. Further, we investigate parameters influencing the iterative equation system solvers GMRES and BiCGStab in combination with ILU preconditioners. The tests are done with the software DELPHIN 6 and the article concludes with recommendation for suitable initial parameter selection based on system size and presents a short methodology on how to optimise parameters based on collected solver metrics.

EINLEITUNG

Die Modellierung hygrothermischer Prozesse in kapillarporösen Baustoffen ist bereits seit längerem Stand der Technik und bereits standardisiert (DIN, 2007). Im Simulationsprogramm DELPHIN (Nicolai 2007, Nicolai 2020) sind eine Vielzahl von Modellen implementiert, wobei wir uns in diesem Artikel auf das hygrothermische Basismodell mit zwei gekoppelten Bilanzgleichungen für Energie- und Feuchtemassendichten beschränken. Bei der Verwendung der Software DELPHIN im Planungsprozess, vor allem bei der Sanierungsplanung historischer bzw. denkmalgeschützter Gebäude, werden zunehmend auch dreidimensionale Details analysiert, meist in Verbindung mit in Außenwände einbindenden Trägern oder Befestigungselementen.

Die typische Zielgruppe für die hygrothermischen Bauteilsimulation zur Planungsunterstützung sind Bauphysiker, Ingenieure aber auch Studenten und Wissenschaftler. Daher müssen Simulationsergebnisse auf typischen Stand-PCs/Workstations und Notebooks in akzeptablen Zeiten bereitstehen (Nutzung von Rechenzentren an Universitäten sind die Ausnahme). Hinsichtlich der Parallelisierung wird von 4-16 Kernen ausgegangen, bspw. bei einem Workstation-PC mit ThreadRipper 1950x CPU (2018, 16 Kerne, 3.4 Ghz), der für das 3D Beispiel verwendet wurde.

Kurzbeschreibung der relevanten Algorithmen

Das Lösungsverfahren in DELPHIN verwendet die Finite-Volumen-Methode für die Raumdiskretisierung, wobei orthogonale Berechnungsgitter mit variablen Elementdimensionen verwendet werden. Naturgemäß führt die Gittergenerierung bei 3D-Details zu einer großen Anzahl von Lösungsvariablen, welche effiziente numerische Verfahren einschließlich Parallelisierung erfordert.

Das numerische Lösungsverfahren in DELPHIN verwendet viele Teilkomponenten. Für die Zeitintegration wird der CVODE Integrator verwendet (Hindmarsh et al., 2005), einem Integrator mit Zeitschrittadaption basierend auf Fehlerkontrolle und variabler Methodenordnung.

Das implizite Lösungsverfahren (BDF) benötigt für die modifizierte Newton-Iteration Löser für lineare Gleichungssysteme. Hier stehen viele verschiedene zur Verfügung, beginnend mit direkten LU-Faktorisierungsverfahren über iterative Gleichungssystemlöser (Meister, 2008). Die direkten Verfahren sind spezialisiert auf Bandstrukturen bzw. für generische, schwach besetzte Matrizen (KLU, s. Davis & Natarajan, 2010). Für die iterativen Verfahren GMRES, BiCGStab und TFQMR (Hindmarsh et al., 2005) sind zudem Vorkonditionierer notwendig. In diesem Artikel wird ausschließlich die unvollständige LR-Zerlegung (ILU) als Vorkonditionierer (Saad, 2003) betrachtet.

Viele dieser Algorithmen und Verfahren können durch Parameter angepasst und aufeinander abgestimmt werden. Der Fokus dieses Artikels liegt auf einer Analyse einiger dieser Parameter und deren Einfluss auf die Simulationsgeschwindigkeit.

GITTERVARIATION

Numerische Fehler in der Bauteilsimulation stammen aus der Approximation der räumlichen Verteilung von Zustandsgrößen und daraus abgeleiteter Gradienten und Flussgrößen, sowie aus der zeitlichen Integration der Erhaltungsgleichungen. Erstere sind stark an das geometrische Berechnungsgitter gekoppelt. Das Thema Zeitintegrationsfehler wird im nächsten Abschnitt diskutiert.

Stand der Technik ist die Verwendung von variablen Gitterbreiten, mit typischerweise 3 wesentlichen Parametern:

- Abmessungen der Elemente an Rändern bzw. Materialgrenzen (Parameter: min),
- größte maximale Elementabmessung (Parameter: max) und
- größtes Vergrößerungsverhältnis (Parameter: stretch für Stretchfaktor) zwischen benachbarten Elementen.

Der Parameter der maximalen Elementabmessung ist typischerweise dann wichtig, wenn starke Gradienten (z.B. durch Schlagregeneintrag oder Kondensatbildung) im Inneren einer Materialschicht auftreten können. Generell ist eine Begrenzung auf 5 bis 10 cm ein sinnvoller Grenzwert.

Wesentlich kritischer ist die Dimension/Dicke eines Elements am Rand bzw. an Materialschichtgrenzen. An den Rändern treten bei realistischer Bewitterung häufig die größten Temperatur- und Feuchtegehaltsgradienten auf. An Materialgrenzen sind unstetige Materialparameter zu berücksichtigen, wobei Fehler bei der Mittellung von Transportkoeffizienten durch kleine Elementabmessungen reduziert werden können. Daher ist die Elementdicke am Rand und an Schichtgrenzen der mit Abstand wirksamste Parameter zur Reduktion von numerischen Fehlern.

Methodik der Gittersensitivitätsstudie

Das Ziel einer Gittersensitivitätsstudie ist letztlich ein möglichst grobes Gitter zu finden, ohne jedoch physikalische Effekte durch numerische Fehler zu verfälschen. Dazu wird folgendes Prozedere empfohlen, wobei jeweils ein Teil der Simulation getestet wird, der möglichst repräsentative Effekte zeigt (bspw. ein Schlagregeneignis mit anschließender Trocknung):

- Variation der Elementabmessung am Rand (bspw. 1, 1,3 und 2 mm), dabei Beibehaltung eines moderaten Vergrößerungsfaktors (z.B. 2) und maximaler Elementbreite (10 cm); Beibehaltung der Größe, bei der gegenüber der nächstkleineren Größe keine signifikanten Abweichungen auftreten.
- Variation des Vergrößerungsfaktors; Beibehaltung des Faktors, welcher gegenüber dem nächstkleineren Faktor keine groben Fehler zeigt.

Die maximale Elementbreite muss unserer Erfahrung nach nur dann beschränkt werden, wenn entweder starke Gradienten im Simulationsfall zu erwarten sind (bspw. Nachrechnung eines Aufsaugversuchs), oder falls starke Gradienten in Bereichen groben Gitters während des Post-Processing beobachtet werden (gradientenbasierte Gitterverfeinerung).

Das Kriterium *“keine groben Fehler”* wird idealerweise durch das Auswerten von Sensorgrößen an kritischen Stellen der Konstruktion ausgewertet.

Auswirkungen auf Simulationsverhalten

Die Veränderung des geometrischen Gitters beeinflusst die Simulation zweifach:

Kleine Volumina in Elementen (vor allem in Eckbereichen bewirkt bspw. die Veränderung von 1,3x1,3 mm² auf 1x1 mm² eine Verkleinerung der Fläche bzw. des Volumens um 69%) führen dazu, dass Ströme oder Quellterme in diesen Elementen zu deutlich beschleunigten Reaktionen der sensiblen Größen führen. Diese erhöhte Dynamik kann verstärkt zu Konvergenzfehlern im Newton-Verfahren bzw. mehr Iterationen führen und zwingt einen fehlerschätzer-basierten Integrator dazu, kleinere Integrationschritte zu wählen. Damit steigt bei kleineren Elementen die Anzahl der zu absolvierenden Schritte und je Schritt die Anzahl an Newton-Iterationen.

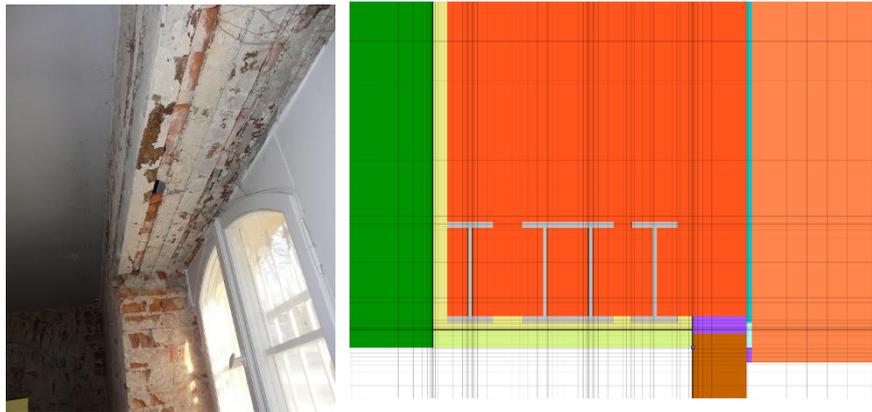


Abbildung 1: Fenstersturz vor Sanierung (links) und Simulationsmodell mit Sanierungsvariante (rechts).

- Kleinere und damit mehr Elemente vergrößern die Anzahl der Unbekannten. Der Aufwand für die meisten numerischen Algorithmen zur Lösung von Gleichungssystemen skalieren in höherer Potenz mit der Anzahl der Unbekannten, bspw. hat die LU-Zerlegung einer Matrix die Komplexität $O(n^3)$ (auch die einer Bandmatrix), iterative Verfahren skalieren je nach Verfahren mit $O(n^2)$ bzw. schwach $O(n^3)$. Damit vergrößert sich der Aufwand je Newton-Iteration zum Teil deutlich.

Die Kombination aus beiden Effekten zeigt, dass eine Gittersensitivitätsstudie maßgeblich zu einer Optimierung der Simulationsgeschwindigkeit beitragen kann. Nebenbei wird verhindert, dass numerische Fehler aus der Gitterwahl unbemerkt bleiben.

Beispiel für Gitteroptimierung

Anhand eines einfachen 2D-Beispiels soll eine Gitteranalyse und die Auswirkung auf die Performance gezeigt werden. Das in Abbildung 1 gezeigte Konstruktionsdetail wird in DELPHIN als 2D-Schnitt durch den Fenstersturz modelliert. Es werden exemplarisch drei Gittervarianten getestet. Tabelle 1 enthält Details zur Gittererstellung.

Die Gittersensitivitätsstudie wird mit einem direkten Gleichungssystemlöser (KLU) durchgeführt. Als Vergleichsgröße zur Bewertung der Gittervarianten wird die Gesamtfeuchtemasse in der Konstruktion betrachtet (Temperatur und Luftfeuchte in der Laibungsecke wären ebenfalls gute Größen). Abbildung 2 zeigt einen Ausschnitt der Simulationsergebnisse. Die Varianten mit normalem und feinem Gitter liefern offensichtlich sehr ähnliche Ergebnisse, sodass die Gitterdetailstufe bei der Variante „Normal“ ausreicht.

Tabelle 1:
Gittervarianten beim 2D-Fenstersturzdetail; letzte Spalte zeigt Elementzahl, Anzahl der Unbekannten (2 Bilanzgleichungen je Element) und Bandbreite (BW) der Jacobimatrix.

GITTER	MIN [mm]	STRETCH	MAX [mm]	ELEM./ VARS (BW)
grob	2,0	2,0	100	5804 / 11608 (187)
normal	1,3	1,75	100	9019 / 18038 (231)
fein	1,0	1,3	50	22663 / 45326 (371)

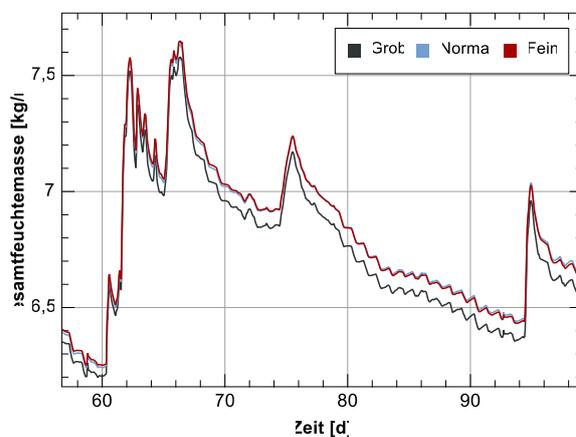


Abbildung 2: Vergleich der Ergebnisse bei der Sensitivitätsstudie. Die Ergebnisse der Varianten „Normal“ und „Fein“ liegen nahezu übereinander, beim groben Gitter gibt es sichtbare Abweichungen.

Um den Einfluss des Gitters auf die Ausführungszeiten zu verdeutlichen, zeigt Tabelle 2 eine Zusammenfassung der Laufzeiten in Minuten (für die ersten 120 Tage der Simulation) und für zwei typische Vertreter der direkten Gleichungssystemlöser (Band und KLU). Bei gleichem Gitter sind die Ergebnisse der Band-Matrix und KLU-Varianten im Rahmen der geforderten Genauigkeit nahezu identisch, und auch

das Konvergenzverhalten und die Anzahl der Integrationsschritte sind sehr ähnlich.

Tabelle 2:

Laufzeiten [min] der Simulationen und Zeitaufwand für Teilmodule des Rechenkerns für die direkten LGS-Löser Band und KLU (Jac - Jacobi-Matrix Berechnung, Fact - Faktorisierung der Matrix, Solve - Rückwärtsauflösen).

VARIANTE	LAUFZEIT	JAC	FACT	SOLVE
Band/grob	20,5	4,5	7,3	5,7
Band/normal	53,8	14,4	21,1	12,0
Band/fein	375,9	148,7	155,6	45,8
KLU/grob	13,2	0,4	7,8	2,9
KLU/normal	32,2	1,2	20,6	5,9
KLU/fein	167,4	6,4	125,0	20,4

Bei beiden LGS-Lösern wird die oben angesprochene Skalierung der Laufzeiten sehr gut deutlich, vor allem beim Teilaufwand für das Faktorisieren der Matrix. Gleichzeitig zeigt sich auch, dass traditionelle Band-Matrix-Löser den direkten Lösungsverfahren für schwach besetzte Matrizen (wie z.B. KLU) selbst bei groben Gittern und kleineren Bandbreiten unterlegen sind. Bei der Übersicht über die Laufzeitanteile in Tabelle 2 fällt weiterhin auf, dass gerade die zeitaufwändigsten Operationen Faktorisierung und Rückwärts-Auflösen strikt sequentielle Algorithmen sind, welche sich nicht parallelisieren lassen. Für eine weitere Performancesteigerung sind deshalb iterative Gleichungssystemlöser nötig.

ZEITINTEGRAL-FEHLERKONTROLLE

Moderne Zeitintegrationsverfahren verwenden Methoden zur Adaption des Zeitschritts, um die geforderte Genauigkeit einzuhalten (vgl. Kap. 8 in Press, 2002). Der Zeitintegrator CVODE in DELPHIN passt sowohl die Zeitschrittlänge als auch Methodenordnung entsprechend eines Fehlerschätzers an. Innerhalb des impliziten Verfahrens wird

die vom Newton-Verfahren gelieferte Lösung dafür verwendet. Daher muss die Newton-Iteration *genau genug* konvergieren, um hinreichend genaue Lösungsgrößen zu liefern.

Sowohl das Newton-Verfahren als auch der Fehlerschätzer basieren auf den gleichen Fehlernormen, wobei für die Konvergenz des Newton-Verfahrens das Kriterium um einen Faktor verschärft wird (üblicherweise 0,1), um eine ausreichend genaue Newton-Lösung zu erzwingen. Dieser Faktor bzw. *Koeffizient für Konvergenz des nichtlinearen Verfahrens* (NonlinConvCoef) kann ein wichtiger Optimierungsparameter sein. Ist der Koeffizient zu groß, führt das zwar zu wenig Newton-Konvergenzfehlern, dafür unter Umständen zu mehr Fehlerschätzerfehlern. Im Gegensatz dazu könnte bei einem kleinen Koeffizienten das Newton-Verfahren häufiger scheitern, dafür würden aber im Schnitt größere Zeitschritte gewählt werden und damit insgesamt weniger Newton-Verfahren ausgeführt werden. Letzteres ist auch der Grund, warum eine Verschärfung der Konvergenzforderungen an das Newton-Verfahren die Simulationsgeschwindigkeit steigern kann, obwohl dies bei anderen Simulationsprogrammen ohne Fehlerschätzer eher nachteilig ist.

Bei den meisten Simulationen ist der voreingestellte Faktor von 0,1 ausreichend. Beim Auftreten vieler Fehlerschätzerüberschreitungen (Abb. 3, Zeile 7) kann man diesen Koeffizienten auf 0,08 oder noch kleinere Werte reduzieren. Sollten dann in der Solver-Statistikausgabe sehr viele Newton-Konvergenzfehler ausgewiesen werden (Abb. 3, Zeile 6), so ist der Koeffizient zu klein gewählt.

Durch Anpassung dieses Koeffizienten sind in Verbindung mit iterativen Gleichungssystemlösern mitunter größere Performancesteigerungen möglich (siehe spätere 3D-Beispiele).

```

Solver statistics
-----
1  Wall clock time = 0.833 h
-----
2  Framework: Output writing = 0.006 h ( 0.69 %)
3  Framework: Step-completed calculations = 0.000 h ( 0.00 %)
4  Integrator: Steps = 9406
5  Integrator: Newton iterations = 17111
6  Integrator: Newton convergence failures = 208
7  Integrator: Error test failures = 35
8  Integrator: Function evaluation (Newton) = 0.183 h (21.93 %) 17112
9  Integrator: LES setup = 0.247 h (29.69 %) 1380
10 Integrator: LES solve = 0.372 h (44.65 %) 17111
11 LES: Linear iterations = 34916
12 LES: Linear convergence failures = 1475
13 LES: Function evaluations (LS solve) = 0.000 h ( 0.00 %)
14 LES: Function evaluations (Jacobian gen.) = 0.140 h (16.77 %) 16666
15 LES: Jacobian matrix assembly time = 0.174 h (20.84 %)
16 LES: Matrix-vector multiplications = 0.035 h ( 4.23 %) 69832
17 LES: Function evaluations (precond. setup) = 0.000 h ( 0.00 %) 0
18 LES: Preconditioner setup = 0.074 h ( 8.86 %) 641
19 LES: Preconditioner solves = 0.251 h (30.15 %) 86899
-----
    
```

Abbildung 3: Statistiken und Performancemetriken bei einem Solverlauf mit iterativen Gleichungssystemlösern.

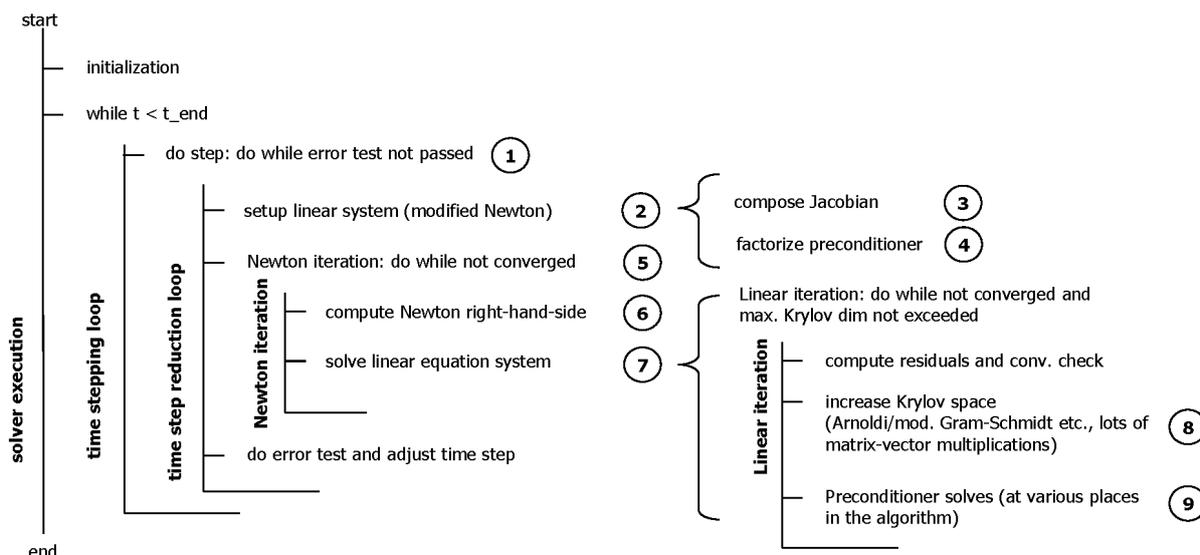


Abbildung 4: Schematik der Module und Schleifenstrukturen des numerischen Rechenkerns bei Verwendung iterativer Gleichungssystemlöser.

ITERATIVE GLEICHUNGSSYSTEMLÖSER

Anstelle der direkten LGS-Löser werden nun iterative Lösungsverfahren aus der Klasse der Krylow-Unterraumverfahren verwendet, wobei in diesem Artikel lediglich die Verfahren GMRES und BiCGStab (Meister 2007, Saad 2003) verwendet werden. Beide sind für asymmetrische Matrizen geeignet, wobei die Matrizen in DELPHIN zwar assymetrisch sind, aber grundsätzlich eine symmetrische *Besetzung* aufweisen (welches hinsichtlich der Speicherstruktur und Matrizenoperationen ausgenutzt wird).

Mit den Iterationsschleifen des linearen Gleichungssystemlösers sind insgesamt 4 Schleifen geschachtelt, was in Abbildung 4 verdeutlicht wird.

Während der Simulationsausführung protokolliert DELPHIN die Anzahl der Aufrufe einzelner Module und die Zeit, welche dafür verwendet wird. Ein Beispiel für die generierte Ausgabe der Solverstatistiken und Metriken ist in Abbildung 3 gezeigt. Diese ist hilfreich für die Optimierung der einzelnen Numerikparameter. Relevant für die Auswertung sind folgende Zeilen:

- Z1. Gesamtlaufzeit der Simulation
- Z4. Gesamtzahl der Integrationsschritte
- Z5. Anzahl der Newton-Iterationen
- Z6. Newton-Konvergenzfehler
- Z7. Fehlerschätzerüberschreitungen
- Z8. Auswertungen der Systemfunktion während der Newton-Iterationen
- Z9. Vorbereitung des linearen Gleichungssystems
- Z10. Lösen des linearen Gleichungssystems

Der Zeitaufwand in den Zeilen 2, 3, 8, 9 und 10 summiert sich in etwa zur Gesamtlaufzeit der Simulation (abzüglich eines kleinen nicht erfassten Aufwands in kleineren Funktionen). Der Aufwand für

das Vorbereiten des linearen Gleichungssystems ist weiterhin aufgeschlüsselt in den Zeilen:

- Z14. Funktionsauswertungen zur Berechnung der Jacobimatrix
- Z15. Gesamtaufwand für die Berechnung der Jacobimatrix (enthält Z14)
- Z18. Berechnung und im Fall der ILU die Zerlegung der Vorkonditionierer-Matrix

sodass sich Z15 und Z18 zusammen ungefähr zum Zeitaufwand in Zeile 9 summieren. In Abbildung 4 entspricht das (2), (3) und (4).

Der Aufwand für das Lösen des linearen Gleichungssystems (Summe in Zeile 10) schlüsselt sich auf in:

- Z16. Matrix-Vektor-Multiplikationen
- Z19. Anwendungen des Vorkonditionierers

sodass Z16 und Z19 (und ein nicht erfasster Zusatzaufwand des eigentlichen Iterationsverfahrens) zusammen den Zeitaufwand in Zeile 10 ergeben. Dies entspricht in Abbildung 4 den Punkten (7), (8) und (9), d. h. der innersten Schleife des Algorithmus.

Hinsichtlich der Parallelisierung des Rechenkerns sollte noch erwähnt werden, dass die Operationen des ILU-Vorkonditionierers (Zeilen 18 und 19) nicht parallelisiert werden können. Für die eigentliche Performance-Optimierung sind jedoch nicht die absoluten/relativen Zeiten wichtig, sondern vielmehr die Ausführungsanzahl der einzelnen Operationen, bzw. die Fehleranzahl (siehe Zeilen 6, 7 und 12).

Konvergenzforderungen

Die Verwendung eines iterativen Gleichungssystemlösers innerhalb einer Newton-Iteration weist einige Besonderheiten auf. Zum einen sind die Änderungen der Lösungsgrößen von einem

Newton-Schritt zum nächsten typischerweise klein und werden mit zunehmender Konvergenz des Newton-Verfahrens sehr klein. Dadurch werden üblicherweise nur wenige Iterationen benötigt. Entscheidend für die Konvergenz des Newton-Verfahrens ist jedoch, dass die im iterativen Verfahren berechnete Lösung (=Korrekturvektor für den Newton-Schritt) *genau genug* ist, um Newton-Konvergenz zu ermöglichen.

Als Konvergenzkriterium für die Lösung des linearen Gleichungssystems (LGS) wird die gewichtete Quadratsummen-Wurzelnorm des Residualvektors mit einem Grenzwert verglichen. Der Grenzwert bestimmt sich aus den Genauigkeitsforderungen des Newton-Algorithmus. Zusätzlich wird der Grenzwert durch einen *linearen Konvergenzkoeffizienten* (LinIterConvCoef) < 1 abgemindert. Dadurch wird gefordert, dass das Residuum genauer bestimmt wird, als die vom Newton-Verfahren geforderte Genauigkeit.

Ist die Genauigkeitsforderung an das lineare Verfahren zu hoch, kann dies zu sehr vielen Iterationen führen, bzw. das Verfahren konvergiert aufgrund der begrenzten Zahlengenauigkeit bei Computerzahlen überhaupt nicht. Deshalb wird die Anzahl der Iterationen und damit die *Dimension des Krylow-Unterraums* durch einen Parameter begrenzt. Die Iteration wird beim Erreichen dieser Grenze abgebrochen, ein linearer Konvergenzfehler verzeichnet (siehe Abb. 3, Zeile 12) und die bis dahin berechnete Lösung dem Newton-Verfahren übergeben. Dies wirkt sich mitunter negativ auf die Konvergenz des Newton-Verfahrens aus. Daher ist eine große Anzahl an Konvergenzfehlern im linearen GleichungssystemlÖser immer auch ein Indikator für verschenkte Performance. Im Gegenzug sollte man den Krylow-Unterraum nicht zu groß wählen, da vor allem beim GMRES-Verfahren der Aufwand mit der Größe des Unterraums steigt.

Für die effiziente Verwendung eines iterativen GleichungssystemlÖsers ist ein Vorkonditionierer notwendig, wobei in diesem Artikel ausschließlich die unvollständige LR-Zerlegung der Matrix verwendet wird (ILU). Die ILU-Faktorisierung und Anwendung ist allerdings ein sequentieller Algorithmus und kann nicht parallelisiert werden

Tabelle 3 zeigt für die Variante mit „normalem“ Gitter den Vergleich der Laufzeiten bei den direkten Verfahren und den iterativen Lösern. Letztere wurden jeweils mit verschiedenen Krylow-Unterraum-Begrenzungen ausgeführt. Wie erwartet nimmt die Anzahl der Konvergenzfehler im LGS-LÖser bei größeren Unterräumen (mehr Iterationen) ab, welches sich auch günstig auf die Newton-Iterationen auswirkt.

Tabelle 3:

Laufzeiten [min] und Statistiken für verschiedene LGS-LÖser (Steps - Anzahl der Integrationsschritte, NLC - Konvergenzfehler im linearen GleichungssystemlÖser, NC - Konvergenzfehler des Newton-Verfahrens, ERR - Fehlerschätzerüberschreitungen). Fett gedruckt sind die jeweils besten Varianten für die beiden Verfahren.

VARIANTE	ZEIT	STEPS	NLC	NC	ERR
Band	53,8	61999	-	415	2696
KLU	32,2	63360	-	424	2752
GMRES(10)	17,5	70034	36403	3926	1280
GMRES(15)	12,9	62421	6314	652	2487
GMRES(20)	13,1	61419	916	416	2630
GMRES(25)	12,8	61881	148	438	2629
GMRES(30)	12,6	61025	31	413	2644
GMRES(40)	13,0	61494	0	417	2683
BiCGStab(10)	13,8	62369	8807	729	2445
BiCGStab(15)	13,0	61577	1104	423	2657
BiCGStab(20)	13,2	62061	116	420	2617
BiCGStab(30)	13,9	61300	4	402	2704

Interessant ist die Variante GMRES(10), bei der die Anzahl der linearen Iterationen eindeutig zu stark begrenzt ist. Dies führt zu sehr vielen vorzeitigen Verfahrensabbrüchen im LGS-LÖser, und entsprechend starken Konvergenzproblemen im Newton-Verfahren. Da ein Newton-Konvergenzfehler zur Wiederholung der Integrationsschritte mit kleineren Schrittgrößen führt, sind diese bei diesem Fall häufig *konvergenzdominiert*, statt durch den Integrationsfehlerschätzer begrenzt zu werden. Dies drückt sich durch eine entsprechend geringere Anzahl an Fehlerschätzerfehlern (ERR) aus.

Bei allen anderen Fällen liegen die Zeitschritte in etwa in der gleichen Größenordnung, welches an der ungefähr ähnlichen Gesamtzahl an Integrations-schritten ablesbar ist. Es fällt auch auf, dass die Güte der Lösung bei den iterativen Verfahren den der exakten direkten Verfahren entspricht. Das Optimum beim GMRES liegt bei 30 Iterationen und beim BiCGStab bei 15 Iterationen, ist also eindeutig verfahrensabhängig. Wird die maximale Krylow-Unterraumgröße zu groß gewählt, leidet die Performance.

Aus der 2D-Studie und unseren Erfahrungswerten aus vielen anderen Simulationen können wir bereits folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Veränderung des Gitters hat den weitaus größten Einfluss auf die Simulationsgeschwindigkeit, vor allem bei der Verwendung von direkten Verfahren.
- Bei 2D-Problemen ist der KLU-LÖser grundsätzlich dem traditionellen Band-Matrix-LÖser überlegen.

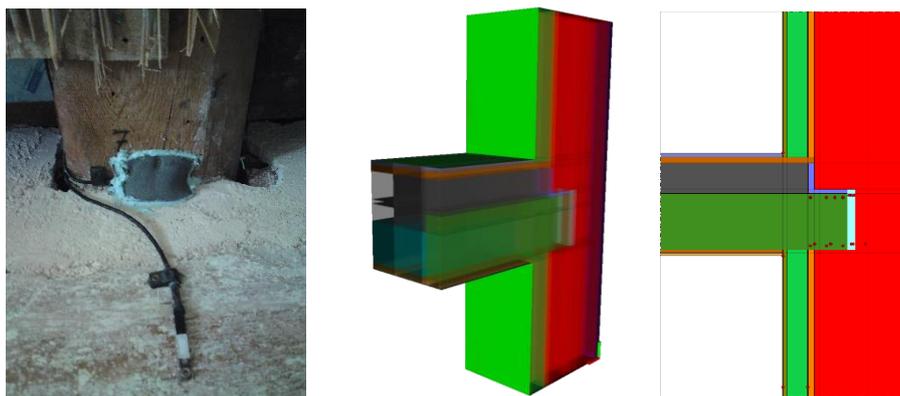


Abbildung 5: Balken (instrumentiert, von unten fotografiert) vor Anbringen der Dämmung (links), 3D Simulationsmodell mit Symmetrieschnitt durch den Deckenbalken (mitte), 2D-Modellansicht der Schnittenebene ohne Berechnungsgitter und mit Punkten der Ergebnisausgabe (rechts).

- Bereits bei Modellgrößen von ca. 5000 Elementen sind die iterativen Gleichungssystemlöser den direkten Verfahren überlegen (z.B. benötigt GMRES(30) nur 5,2 min beim groben Gitter verglichen mit 13,2 min bei Verwendung von KLU).
- Die optimale Maximalgröße des Krylow-Unterraums hängt vom Lösungsverfahren und physikalischen Problem ab und sollte individuell optimiert werden.

3D-MODELLE

Die Optimierung von 3D-Modellen erfolgt prinzipiell in ähnlicher Weise. Aufgrund der langen Simulationszeiten (nach bereits langen Initialisierungszeiten) ist es in der Ingenieurspraxis nicht zielführend, mehrere Parametervarianten über einen längeren Simulationszeitraum auszutesten. Die Einsparung in der endgültigen Simulation würden durch den anfänglichen Mehraufwand überdeckt werden. Wir haben für ein 3D-Fallbeispiel verschiedene Parametervarianten getestet. Bei diesem Beispiel durchstößt ein Deckenbalken eine Dämmschicht (siehe Abb. 5). Zur besseren Übersicht ist nicht das endgültig verwendete Diskretisierungsraster gezeigt, sondern lediglich die Schichten, welche sich aus dem Geometriaufbau ergeben.

Ausgehend von einer vorgelagerten Gittersensitivitätsstudie wurde ein Gitter mit den Generierungsoptionen $min=2mm$, $stretch=2$, $max=200mm$ gewählt (381300 Lösungsvariablen), welches hier einen guten Kompromiss zwischen erträglicher Rechenzeit und Genauigkeit bildet.

Variation: Iterationsgrenze beim linearen Verfahren

Basierend auf den Erfahrungen mit dem 2D-Fallbeispiel werden Variantenstudien unter Veränderung der Maximalgröße des Krylow-Unterraums durchgeführt. Dabei werden die beiden iterativen Solver GMRES und BiCGStab verwendet.

Die physikalischen Ergebnisse aller Varianten (auch der späteren, längeren Simulationen) waren durch die Integrationsfehlerkontrolle nahezu identisch, weswegen auf eine Auswertung der Ergebnisse verzichtet werden kann.

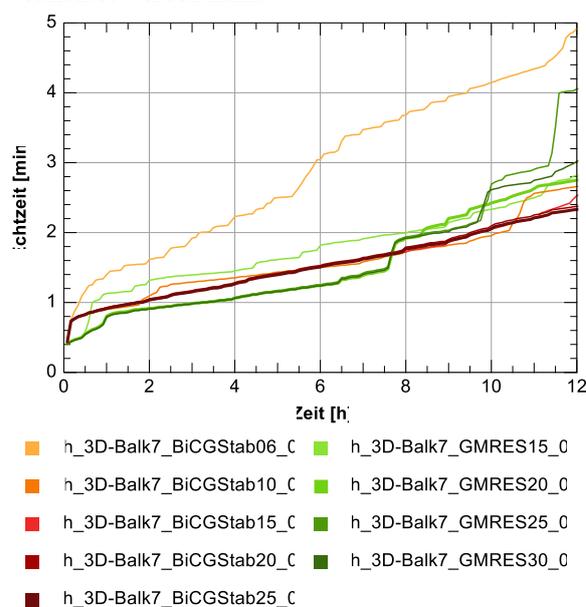
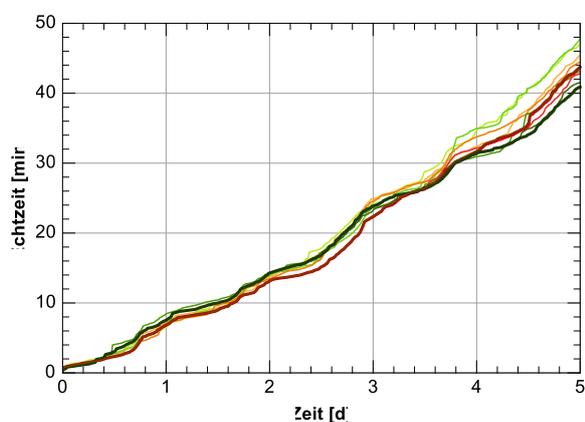


Abbildung 6: Simulationengeschwindigkeitsvergleich bei veränderten Iterationszahlgrenzen für die linearen Gleichungssystemlöser. Rechendauer (Echtzeit) ist aufgetragen über Simulationszeit, niedrigere Kurven bedeuten schnellere Simulation. GMRES(20) und BiCGStab(25) sind die jeweils besten Varianten (dicke Linien)

Zunächst wurden folgende numerische Parameter verwendet: $reltol = 5e-5$, $NonlinConvCoef = 0.1$, $LinIterConvCoef = 0.08$. Die letzteren Parameter sind die oben besprochenen Konvergenzkoeffizienten für das Newton-Verfahren und das lineare Krylow-Unterraum-Iterationsverfahren. Die Simulationen wurden zunächst jeweils für einen Simulationszeitraum von 12 h (ca. 4 min Echtzeit je Simulation) ausgeführt.

Abbildung 6 zeigt ein Echtzeit-Simulationszeit-Diagramm, bei dem der zeitliche Verlauf der Simulationsgeschwindigkeit gut ablesbar ist. Die Varianten GMRES(20) mit MaxKrylowDim = 20 und BiCGStab(25) (d.h. max. 25 lineare Iterationen) waren dabei die schnellsten. Bei allen Varianten mit mehr als 20 Iterationen traten nur noch sehr wenige Konvergenzfehler im LGS auf. Eine weitere Erhöhung der Iterationsgrenze führte bis zum Ende der 12 h eher zu einer Verlangsamung. Die Variante BiCGStab(6) zeigt eindrucksvoll an der deutlich längeren Simulationszeit (Faktor 2), welchen Einfluss eine zu starke Begrenzung der Iterationen hat.

Die ersten Stunden der Simulation sind jedoch häufig noch nicht wirklich aussagekräftig, da sie vor allem bei massiven Konstruktionen durch die Anfangsbedingungen dominiert werden. Die Simulationen wurden daher bis zu 5 Tagen Simulationszeit fortgeführt (Abb. 7).



- h_3D-Balk7_GMRES15_C ■ h_3D-Balk7_BiCGStab15_C
- h_3D-Balk7_GMRES20_C ■ h_3D-Balk7_BiCGStab20_C
- h_3D-Balk7_GMRES25_C ■ h_3D-Balk7_BiCGStab25_C
- h_3D-Balk7_GMRES30_C ■ h_3D-Balk7_BiCGStab30_C
- h_3D-Balk7_GMRES35_C ■ h_3D-Balk7_BiCGStab35_C

Abbildung 7: Geschwindigkeitsvergleich in den ersten 5 Tagen. GMRES(35) und BiCGStab(30) sind die jeweils besten Varianten (dicke Linien).

Zunächst fällt auf, dass die Unterschiede in der Simulationszeit insgesamt doch recht gering sind. Die Varianten mit den eindeutig zu kleinen Iterationsgrenzen (MaxKrylowDim < 15) sind im Diagramm nicht dargestellt. Bei den Varianten mit Krylow-Unterraum > 25 treten kaum noch Konvergenzfehler beim linearen Verfahren auf. Eine weitere Erhöhung der Iterationsgrenze brachte keine weitere Leistungssteigerung, z.B. war die Variante BiCGStab(35) leicht langsamer als BiCGStab(30). Auch besteht das Risiko, die mit zunehmender Iterationszahl akkumulierenden numerischen Fehler im GMRES- oder BiCGStab-Verfahren in das Newton-Verfahren einzubringen. Dieses konvergiert dann zwar, jedoch auf ein verfälschtes Ergebnis,

welches dann zu einer erhöhten Zahl von Fehlerschätzerüberschreitungen führt.

Variation: Konvergenzkoeffizient für das Newton-Verfahren

Dies lässt sich durch Anpassung des bereits beschriebenen Konvergenzkoeffizienten für die nichtlineare Iteration verbessern. Abbildung 8 zeigt den Vergleich der Varianten GMRES(30), mit unverändertem LinIterConvCoef = 0,08, aber verschiedenen Werten für NonLinConvCoef = 0,01, 0,02, 0,04, 0,06, 0,08 und 0,1 (bisherige Varianten).

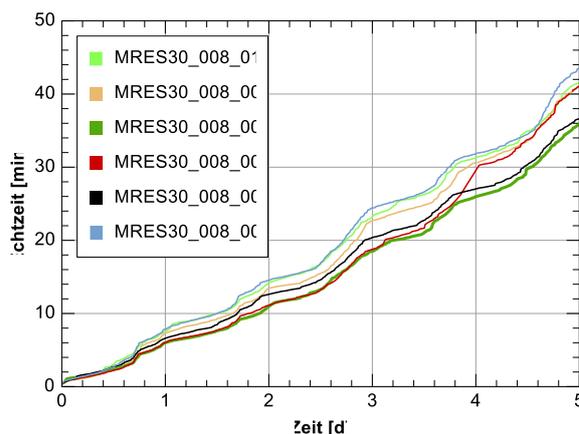


Abbildung 8: Geschwindigkeitsvergleich bei den Varianten mit verändertem Konvergenzkoeffizienten für die nichtlineare Iteration.

Offensichtlich gelingt es bei Verschärfung der Konvergenzforderungen für das Newton-Verfahren, insgesamt eine genauere numerische Lösung zu erhalten, was zu insgesamt größeren Zeitschritten und damit weniger Gesamtaufwand führt. Es fällt auf, dass bei einem Faktor 0,02 und 0,06 die Geschwindigkeit steigt, bei 0,04 und 0,01 jedoch sinkt.

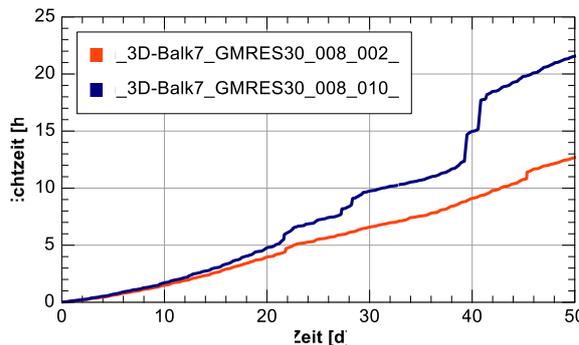


Abbildung 9: Langzeittrend der Varianten mit NonLinConvCoeff=0,1 und 0,02

Dieses Verhalten ist zum einen problemabhängig und gleichzeitig nicht direkt von GMRES auf BiCGStab übertragbar. Auch scheint die Wirkung dieses Parameters bei relativen Toleranzen $> 10^5$ ausgeprägter zu sein. Der Parameter muss also individuell angepasst werden. Der Aufwand lohnt sich jedoch, wie in Abb. 9 im Langzeitvergleich der Basisvariante mit Standardparametern GMRES(30-0,1-0,08) und der optimierten Variante GMRES(30-0,02-0,08) zu sehen ist. Hochgerechnet auf eine Jahressimulation entspricht dies mehr als 30% Simulationszeiteinsparung.

OPTIMIERUNGSMETHODIK

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt lässt sich unserer Erfahrung nach keine allgemeingültige Vorschrift ableiten, welche Kombination aus numerischen Parametern für beliebige Geometrien, Materialdatensätze und Randbedingungen jeweils am günstigsten ist. Eine dynamische Anpassung des Krylov-Unterraums während der Simulation, basierend auf den Messwerten (Konvergenzfehlern) könnte allerdings recht einfach in die Software integriert werden, um so zumindest den wichtigsten Parameter automatisiert zu kalibrieren.

Bei langwierigen Simulationen schlagen wir daher folgende praktische Vorgehensweise zur Optimierung der Parameter vor, wobei ab einer Problemgröße von > 4000 Unbekannten jeweils GMRES(20), bzw. ab 8000 Unbekannten GMRES(30) als Startvariante für den LGS-Löser verwendet wird:

- Ausführung zweier Gittervarianten (*grob* und *normal*) parallel auf zwei getrennten Rechnern. Dabei wird der Unterschied von kritischen Sensorgrößen beobachtet. Weicht das gröbere Gitter zu stark ab, bricht man die Simulation ab und lässt auf dem gleichen Rechner eine noch detaillierte Variante (*fein*) laufen (währenddessen läuft die Variante *normal* weiter). Das Prozedere wird wiederholt, bis ausreichende Übereinstimmung erzielt wird (danach kann die Simulation mit dem detaillierteren Gitter abgebrochen werden).
- Jeder Simulationslauf wird hinsichtlich der linearen Konvergenzfehler überwacht (siehe Abb. 3, Zeile 12, DELPHIN-Log-Datei: LES_iterative_stats.tsv, Spalte NLCFails). Treten sehr viele Konvergenzfehler auf, d.h. das Verhältnis $NLCFails/Steps > 10\%$, wird die Simulation abgebrochen und der Krylov-Unterraum um 5-10 vergrößert. Um nicht die Ergebnisse der bisherigen Simulation zu verschenken, kann die Berechnung in DELPHIN einfach *unterbrochen* und mit verändertem Parameter *fortgesetzt* werden.

- Treten nur noch verhältnismäßig wenig lineare Konvergenzfehler auf, so kann man versuchen, den Konvergenzkoeffizienten für die nichtlineare Iteration zu reduzieren. Dafür sollten dann, wie in Abb. 8 gezeigt, einige Varianten über einen relevanten Zeitraum gerechnet werden, um den Einfluss zu analysieren. Auch hier kann durch Unterbrechen und Fortsetzen der Simulation Zeit gespart werden.

Ungeachtet dessen bleibt eine Gittersensitivitätsstudie und damit mögliche Reduktion der Systemgröße die wichtigste Stellschraube für die numerische Performance.

DANKSAGUNG

Die 3D-Simulationen basieren auf dem Forschungsprojekt OEKO-ID. Dieses wurde vom Österreichischen "Klima- und Energiefonds" der FFG innerhalb der Programmlinie „Neue Energien 2020“ gefördert und von der Steiermärkischen Landesregierung sowie vom Bundesministerium für Unterricht, Kunst und Kultur kofinanziert.

LITERATUR

- Davis, T., & Natarajan, E. 2010. Algorithm 907: KLU, A Direct Sparse Solver for Circuit Simulation Problems. ACM Trans. Math. Softw., 37(01).
- DIN, 2007. DIN EN 15026:2007-07 - Hygrothermal performance of building components and building elements - Assessment of moisture transfer by numerical simulation. Beuth Verlag.
- Hindmarsh, A.C., Brown, P.N., Grant, K.E., Lee, S.L., Serban, R., Shumaker, D.E., & Woodward, C.S. 2005. SUNDIALS: Suite of nonlinear and differential/algebraic equation solvers. ACM TOMS, 31(3), 363–396.
- Meister A. 2008. Numerik linearer Gleichungssysteme. 3. Auflage edn. Springer Vieweg.
- Nicolai A. 2007. Modeling and Numerical Simulation of Salt Transport and Phase Transitions in Unsaturated Porous Building Materials. Ph.D. thesis, Syracuse University.
- Nicolai A. 2020. DELPHIN 6 Webseite. <https://bauklimatik-dresden.de/delphin>.
- Press W. 2002. Numerical recipes in C++ : the art of scientific computing. Cambridge, UK New York: Cambridge University Press.
- Saad Y. 2003. Iterative Methods for Sparse Linear Systems, Second edition. 2. ed., [nachdr.] edn. Philadelphia, PA: SIAM, Society for Industrial and Applied Mathematics.

EINFACHE BERECHNUNG DES NETZDIENLICHKEITSPOTENTIALS VON GEBÄUDEN – CASE STUDY AM BEISPIEL EINES LABORNEUBAUS

L. Frison¹, B. Köhler¹, P. Engelmann¹ und S. Herkel¹

¹Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, Deutschland

KURZFASSUNG

Das Lastverschiebungspotential der Kälteversorgung eines Laborneubaus wird bezüglich verschiedener Netzreferenzgrößen analysiert. Das Ziel ist die Realisierung eines netzdienlichen Gebäudebetriebs, in dem der elektrische Energieverbrauch für die Klimatisierung anhand der Anforderungen des Stromnetzes geregelt wird. Dessen exakte Bewertung und die Entwicklung einer netzdienlichen Regelung erfordert ein ausreichend detailliertes, aber gleichzeitig optimierfähiges Modell der Kälteversorgung. Um diese Notwendigkeit zu umgehen, wird ein einfacher heuristischer Lastverschiebungsalgorithmus auf den Betrieb mehrerer Kälteversorger und mehrerer gleichermaßen wichtige Zielkriterien erweitert. Damit kann eine netzdienliche Regelung mit Kosten- und CO₂-Emissionseinsparungen gefunden werden, die nur einen geringen Mehrverbrauch bezüglich des berechneten effizienzoptimierten Betriebs und des messdatenbasierten Realbetriebs aufweist.

ABSTRACT

The load shifting potential of the cold supply of a new laboratory building is analyzed with regard to various grid reference signals. The aim is the realization of a grid-supportive building operation, in which the electricity consumption for the cold supply is regulated based on requirements of the electricity grid. The exact assessment of the grid flexibility and the development of a grid-supportive control strategy require a sufficiently detailed, but also optimizable model of the cold supply. To avoid this, a heuristic load shifting algorithm is extended to the operation of several cooling plants and several target criteria. This way, a grid-supportive building operation with high cost and CO₂ emission savings is found that has little additional energy consumption compared to the computed energy efficient operation and the real operation based on measurement data.

EINLEITUNG

Der Ausbau dezentraler, auf erneuerbaren Energien basierender Generatoren führt zu starken zeitlichen Schwankungen in der Stromproduktion, gleichzeitig wird zum Erreichen der Klimaschutzziele eine zunehmende Elektrifizierung der Bereiche Wärme- und Kälteversorgung (z.B. Wärmepumpen) und Mobilität (Elektrofahrzeuge) erwartet. Dies stellt

erhöhte Anforderungen an die Stabilität der Stromnetze, da Erzeugung und Last zu jedem Zeitpunkt im Gleichgewicht sein müssen. Alternativ zu traditionellen Lastmanagement-Maßnahmen (regelbare Backup-Kraftwerke, Abschaltung erneuerbarer Energieerzeuger) besteht die Möglichkeit, flexible Stromverbraucher derart zu regeln, dass sie ihren Verbrauch zeitlich an die Bedürfnisse des Stromnetzes anpassen (Demand-Side-Management). Gebäude mit strombasierter Wärme- und Kälteversorgung können so durch Lastglättung und Lastverschiebung in Zukunft aktiv eine netzdienliche Rolle spielen. Durch die Ausnutzung von Umweltenergie und der Bereitstellung von Wärme auf niedrigem Temperaturniveau, bzw. Kälte auf hohem Temperaturniveau, weisen Wärmepumpen und Kältemaschinen ein hohes Effizienzpotential auf und in Verbindung mit thermischen Speichern zusätzlich ein hohes Lastverschiebepotential. Idealerweise erfolgt die Wärme- und Kälteübergabe mit Niedrigexergiesystemen bei niedrigen Vorlauftemperaturen im Heizbetrieb bzw. hohen Vorlauftemperaturen im Kühlbetrieb, was das Potential einer Lastverschiebung zusätzlich vergrößert. Insbesondere im größeren Leistungsbereich – etwa für die Versorgung von Büro- und Gewerbegebäuden – kann durch Interaktion mit dem elektrischen Versorgungsnetz eine Lastverschiebung durch das effiziente Erzeugen und Zwischenspeichern von Wärme und Kälte ermöglicht werden. Dieser Artikel stellt eine Erweiterung bereits vorhandener Studien über das Netzdienlichkeitspotential einzelner Gebäude (Klein et al. 2016, Klein et al. 2017, Bachseitz & Koenigsdorff 2018) dar.

Das Hauptanliegen dieses Artikels ist die Vorstellung eines Verfahrens zur Bewertung des Netzdienlichkeitspotentials, das ein Gebäude mit strombasierter Wärme- oder Kälteversorgung leisten kann. Beispielhaft wird die Potentialanalyse für ein modernes Laborgebäude mit Mischnutzung durchgeführt. Aufgrund der Möglichkeit zur Nutzung mehrerer Kältequellen, der hohen thermischen Speicherkapazität und der ganzjährigen Kältelast durch Labor- und EDV- Nutzung bietet das Gebäude ein großes Netzdienlichkeitspotential. Dessen exakte Bewertung und die Entwicklung einer netzdienlichen Regelung erfordert ein ausreichend detailliertes, aber

gleichzeitig optimierfähiges Modell der Kälteversorgungsanlagen. Um diese Notwendigkeit zu umgehen, wird ein einfacher, bereits vorhandener heuristischer Lastverschiebungsalgorithmus angewandt, der keine detaillierten Modelle benötigt. Dazu wird der bereits veröffentlichte Algorithmus (Klein et al. 2017) einerseits mittels einfacher Modelle auf den Betrieb mehrerer Kälteversorger und andererseits auf mehrere gleichermaßen wichtige Zielkriterien erweitert. Ein Nachteil der Nutzung der Flexibilitätsoptionen für einen netzdienlichen Betrieb ist der oftmals resultierende Mehrverbrauch elektrischer Energie im Vergleich zu einem effizienzoptimierten Betriebs. Mit dem vorgestellten Verfahren kann dagegen eine gleichzeitig effizienzoptimierte und netzdienliche Regelung mit hohen Kosten- und CO₂-Emissionseinsparungen gefunden werden, die nur einen geringeren Mehrverbrauch bezüglich des effizienzoptimierten Betriebs aufweist.

Im Folgenden wird zuerst das verwendete Bewertungskriterium und die Methodik zur Bestimmung netzdienlicher Betriebsführungsstrategien vorgestellt. Durch den Vergleich der netzdienlichen Betriebsstrategien mit dem auf Messdaten basierenden Realbetrieb und dem simulierten effizienzoptimierten Betrieb wird näherungsweise auf das theoretisch erreichbare Netzdienlichkeitspotential des betrachteten Gebäudes geschlossen.

BEWERTUNG NETZDIENLICHKEIT

Eine Flexibilisierung des Strombezugs von Gebäuden, Demand-Response genannt, kann durch unterschiedliche Zielstellungen motiviert werden:

- Maximierung der Eigenbedarfsnutzung von lokal erzeugten Strom (z.B. PV), ggf. unter Berücksichtigung zusätzlicher bedingt regelbarer Verbraucher (z.B. Elektrofahrzeuge)
- Anpassung des Strombezugs an Bedürfnisse des Stromnetzes, z.B. in Form zeitvariabler Elektrizitätspreise, Anreiz-/Strafzahlungen oder Sperrzeiten

Wir betrachten die zweite Zielstellung einer hohen zeitlichen Übereinstimmung von (lokaler) Stromerzeugung und (lokalem) Stromverbrauch. Die relative Stromnachfrage kann durch ein Stromnetzreferenzsignal ausgedrückt werden. Der Begriff „Netz“ wird im erweiterten Sinne gebraucht und steht stellvertretend für das vorgelagerte Energiesystem bzw. den Energiemarkt. Die tatsächliche elektrotechnische Auslastung der Übertragungs- und Verteilnetze wird nicht berücksichtigt.

Referenzgrößen Netzdienlichkeit

Zur Beschreibung der aktuellen Situation im Netz werden die vier zeitvariablen Referenzgrößen (Netzsignale genannt) betrachtet, die eine Bewertung der Netzdienlichkeit hinsichtlich verschiedener Kriterien ermöglichen:

- European Energy Exchange Day-Ahead-Strompreis als Börsenstrompreis
- Residuallast
- Anteil der fluktuierenden erneuerbaren Stromerzeuger am Strommix
- Dynamischer CO₂-Emissionsfaktor

Der EEX-Börsenstrompreis ist ein wirtschaftlicher Indikator, der den Marktwert von Strom widerspiegelt (EPEX 2019). Die Residuallast ist definiert als Differenz zwischen aktuellen, nationalen Strombedarf und dem Anteil der fluktuierenden Einspeisung der erneuerbaren Stromerzeuger, d.h. aus nicht steuerbaren Kraftwerken. Sie ist eine technische Größe, die den Bedarf an konventionell erzeugtem Strom aus regelbaren Kraftwerken für die aktuelle Stunde quantifiziert. Je kleiner die Residuallast, desto größer ist der Anteil der Erneuerbaren Energien bezogen auf den Gesamtstrombedarf. Der Verlauf folgt dem des EEX-Preises. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in Zeiten mit hoher Residuallast die hohen Stromgestehungskosten konventioneller Kraftwerke die Grenzkosten der Stromerzeugung steigen lassen. Dadurch steigt auch der an Einsatzreihenfolge der Kraftwerke gebundene EEX-Preis.

Der Anteil der fluktuierenden erneuerbaren Stromerzeuger am deutschen Strommix, d.h. Wind und PV, repräsentiert die energiepolitische Sichtweise der Netzdienlichkeit. Aufgrund des hohen Anteils von PV-Anlagen zeigt der Verlauf Parallelen zum Verlauf der Globalstrahlung mit einem Tagesmaximum in der Mittagszeit und einem jahreszeitlichen Trend zu geringeren Spitzenwerten im Herbst und Winter. Der dynamische CO₂-Emissionsfaktor ist abhängig von den stündlichen Anteilen verschiedener Energieträger an der Stromproduktion und beinhaltet damit neben den Primärenergiefaktoren den Anteil Wind/PV im Netz. Mithilfe des CO₂-Emissionsfaktors kann der CO₂-Ausstoß des Betriebs annähernd berechnet werden.

Die in Abbildung 1 und Abbildung 2 gezeigten mittleren Tagesgänge der Netzsignale für die Jahre 2015 und 2019 basieren auf den Daten der Bundesnetzagentur (2018). Die Kurven zeigen sowohl den Einfluss der Jahreszeit als auch der Tageszeit. Verglichen mit dem Jahr 2015 verringert sich der CO₂-Ausstoß und die Residuallast, was eine Konsequenz des gestiegenen Anteils der erneuerbaren Energien am Energiemix ist. Ein netzdienliches Verbrauchsprofil bezüglich des EEX-Preises oder der Residuallast verschiebt den Stromverbrauch in die Frühmorgen- und Mittagsstunden, während es einen Bezug am

Morgen und Abend vermeidet. Bezüglich des Anteils der erneuerbaren Energien oder des dynamischen CO₂-Emissionsfaktors verbraucht ein netzdienlich agierendes Gebäude Strom hauptsächlich zur Mittagszeit.

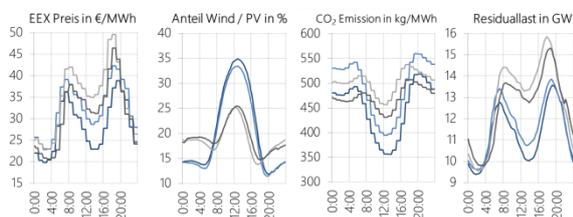


Abbildung 1: Mittlerer Tagesgang der Netzsignale im Frühling (dunkelblau), Sommer (hellblau), Herbst (hellgrau), Winter (dunkelgrau) für das Jahr 2015

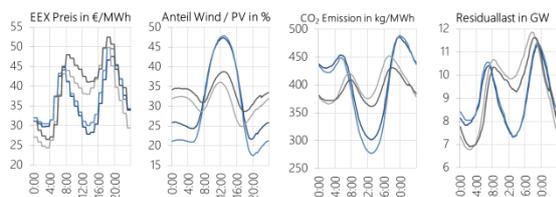


Abbildung 2: Mittlerer Tagesgang der Netzsignale im Frühling (dunkelblau), Sommer (hellblau), Herbst (hellgrau), Winter (dunkelgrau) für das Jahr 2019

Bewertungskriterium

Aus energieökonomischer Sicht kann ein netzdienlicher Betrieb durch Kosten- bzw. CO₂-Einsparungen quantifiziert werden. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt weist der Strompreis einen hohen Fixkostenanteil auf, so dass der Einfluss des variablen Börsenstrompreises jedoch zu gering ausfällt, um die dynamische Nachfragesituation widerzuspiegeln. Als ein über ökonomische Gesichtspunkte hinausgehender Bewertungsmaßstab für die zeitliche Übereinstimmung von lokaler Stromerzeugung und -verbrauch wurde deswegen der „Grid Support Coefficient“ (GSC) (Klein et al. 2016) ausgewählt. Der GSC bewertet das zeitaufgelöste Stromverhaltensverhalten von Gebäuden bezogen auf den Netzsignalverlauf und ist wie folgt definiert:

$$GSC_{abs}(G) := \frac{\sum_{i=1}^n (W_{el}^i \cdot G^i)}{W_{el} \cdot \bar{G}}$$

wobei W_{el}^i und G^i die zeitaufgelösten Werte des Stromverbrauchs bzw. Netzsignals sind, $W_{el} := \sum_{i=1}^n W_{el}^i$ der Gesamtstromverbrauch und $\bar{G} := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G^i$ der Durchschnittswert des Netzsignals. In anderen Worten, der Mittelwert des Netzsignals, bei dem das Gebäude Strom bezieht, wird mit dem absoluten (Jahres-)Mittelwert des Netzsignals verglichen. Für eine einheitliche Interpretation wird das Netzsignal so skaliert, dass ein günstiger Strombezug einem geringen Wert entspricht. Ein netzdienlicher Verbraucher, der seinen Strom zu Zeiten mit geringem Netzsignalwert bezieht,

entspricht einer Kennzahl $GSC_{abs}(G) < 1$. Ein netzadverser Verbraucher resultiert in $GSC_{abs}(G) > 1$, während der netzneutrale Bezug zum mittleren Netzsignalwert einem Wert von $GSC_{abs}(G) = 1$ entspricht.

BESTIMMUNG EINER NETZDIENLICHEN BETRIEBSWEISE

Im Folgenden wird eine einfache Methode beschrieben, eine annähernd optimale, netzdienliche Betriebsstrategie für die Kälte- bzw. Wärmeversorgung eines Gebäudes bestehend aus einer oder mehrerer Anlagen zur Kälte- bzw. Wärmeerzeugung und thermischen Speichern zu bestimmen. Die Berechnung erfolgt ausgehend von einem vorhandenen Lastprofil für den Kälte- bzw. Wärmebedarf des Gebäudes. Nach der Bestimmung einer netzdienlichen Strategie und Bewertung mit einem Bewertungskriterium kann eine Aussage über das Netzdienlichkeitspotential der Anlage getroffen werden. Ein detaillierter Regelungsentwurf, der Einsatz von Simulationssoftware und eine exakte Modellierung des thermischen Verhaltens der Erzeuger sind nicht notwendig. Im Folgenden wird vereinfachend nur die Kälteversorgung betrachtet.

Vorgehensbeschreibung

1. Bestimmung eines möglichst netzdienlichen thermischen Bezugsverhaltens

Durch Anwendung eines heuristischen Algorithmus wird der auf das Netzsignal optimierte Jahresgang der thermischen Leistung der Kältebereitstellung wie folgt bestimmt.

a. Modellierung der Speicherbeladung

Um den Speicherfüllstand abzubilden, wird der Kältespeicher als einfaches Ein-Knoten-State-Of-Charge (SOC) Modell basierend auf der Annahme eines ideal durchmischten Speichers modelliert. Durch diese Näherung lässt sich der SOC des Speichers aus der Temperaturdifferenz zwischen Speichertemperatur und Vorlauftemperatur des Kältekreises, der Dichte und Wärmekapazität des Speichermediums und dem Volumen berechnen. Der Speicher ist vollständig entladen ($SOC = 0$), wenn die Speichertemperatur der Vorlauftemperatur des Kältekreises entspricht und komplett beladen ($SOC = SOC_{lim}$) wenn die definierte Grenztemperatur erreicht wird.

b. Bestimmung der thermischen Maximalleistung

Bei der Betrachtung mehrerer Kälteerzeuger oder Kälteerzeuger mit modulierbarer Leistung muss beachtet werden, dass die Kälteerzeuger abhängig von der Umgebungstemperatur und dem aktuellen Kältebedarf möglichst nahe an der jeweils optimalen thermischen Leistung betrieben werden. Die entsprechenden Regeln – z.B. welcher Erzeuger mit welcher maximalen thermischen Leistung bei welcher

Umgebungstemperatur bevorzugt eingesetzt werden – müssen zuvor aufgestellt werden.

c. Lastverschiebungsalgorithmus

Der in Klein et al. (2017) verwendete Greedy Algorithmus berechnet die optimierte Verteilung der Betriebszeiten der Erzeugung bezüglich eines Referenzsignals. Dabei wird der Speicher einerseits gemäß Lastgang entladen und andererseits iterativ bei günstigem Netzsignal gezielt mit der zuvor berechneten maximalen thermischen Leistung beladen, so dass die Anforderungen an den Speicherzustand ($0 < \text{SOC} < \text{SOC}_{\text{lim}}$) in jedem Zeitpunkt erfüllt sind. Das beschriebene Verfahren wird so lange wiederholt, bis der SOC das ganze Jahr über positiv ist, also eine unterbrechungsfreie Kälteversorgung gewährleistet ist. Mathematisch wird diese Methodik als Greedy Algorithmus bezeichnet, da der Algorithmus jeweils nur lokal im sich sukzessive nach hinten verschiebenden Beladeintervall den Zeitschritt mit dem günstigsten Netzsignal sucht, siehe Abbildung 3. Dies stellt keine global optimale netzdienliche Strategie dar, eignet sich aber gut für eine einfache Abschätzung.

Um thermische Verluste zu berücksichtigen, kann die gemessene Zeitreihe der Leistung des Kälteverteilers mit den abgeschätzten thermischen Verlusten beaufschlagt werden.

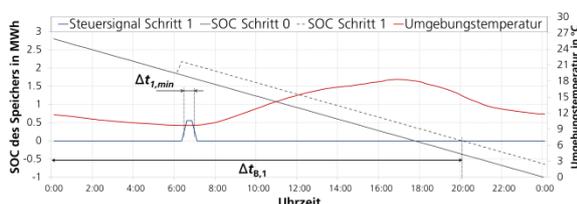


Abbildung 3: Ein Berechnungsschritt des Greedy Algorithmus für temperaturoptimierten Betrieb. Verlauf des SOC des Speichers (grau), Verlauf des SOC nach Beladung im Zeitschritt $\Delta t_{1,min}$, Umgebungstemperatur (rot) und neues Beladeintervall

d. Kombination mehrerer Zielkriterien

Mehrere Zielkriterien, z.B. Netzdienlichkeit hinsichtlich unterschiedlicher Kriterien und gleichzeitig Energieeffizienz, werden durch eine Konvexkombination der Netzsignale in den Lastverschiebungsalgorithmus integriert. Dabei sind unterschiedliche Gewichtungen möglich.

2. Bestimmung des zugehörigen elektrischen Bezugsverhaltens

Das zugehörige elektrische Bezugsverhalten kann vereinfachend mit einem konstanten COP aus dem thermischen Bezugsverhalten bestimmt werden. Da die Effizienz der Kälteversorgungsanlagen von der jeweiligen Temperaturspreizung bzw. Umgebungstemperatur abhängt, erhält man genauere Ergebnisse, wenn diese Abhängigkeit mittels einfacher Modelle berücksichtigt wird. Da aufgrund der hohen Komplexität eine physikalische

Modellbildung ungeeignet ist, wird der empirisch oder aus Herstellerdaten ermittelte Zusammenhang zwischen dem Wirkungsgrad und der Umgebungs-, bzw. Vorlauftemperatur der Bildung des Black-Box-Modells zugrunde gelegt, z.B. in Form einer linearen Abschätzung. Diese wird auf das thermische Bezugsverhalten angewandt. Um bei mehreren Kälteerzeugern zu entscheiden, welcher eingesetzt wird, kann wieder auf einen vorhandenen Regelsatz zurückgegriffen werden.

ANWENDUNG AUF DAS DEMONSTRATORGEBÄUDE

Bei dem betrachteten Gebäude auf dem Campus des Fraunhofer ISE in Freiburg handelt es sich um einen 2011 fertig gestellten Laborneubau mit einer Energiebezugsfläche von 3990 m² (Abbildung 4).



Abbildung 4: Demonstrationsgebäude Laborneubau

Vorstellung Kälteversorgungskonzept

Die in Abbildung 5 schematisch dargestellte niederexergetische Kälteversorgung basiert auf einer luftgekoppelten Kompressionskältemaschine (KKM) und einem hybriden Kühlturm mit einer maximalen Leistung von jeweils 500 kW_{th} und 566 kW_{th}. Die KKM ist stufenlos regelbar durch einen Frequenzumrichter und ermöglicht effiziente Anlaufvorgänge und hohe Wirkungsgrade im Teillastbereich bei einer thermischen Leistung von 100 und 200 kW_{th}. Der Kühlturm dient einerseits zur Abfuhr der Verlustwärme der KKM, andererseits kann er bei geringen Außentemperaturen zur direkten Kühlung genutzt werden. Bei Umgebungstemperaturen unter 11,1°C erfolgt der Wärmeübergang an die Umgebung über freie Konvektion. Durch die Zuschaltung regelbarer Ventilatoren und die Freigabe von Benetzungspumpen zur Verdunstungskühlung ist der Einsatz des Kühlturms für die freie Kühlung laut Herstellerangaben abhängig von der Luftfeuchtigkeit bei Außentemperaturen bis zu 20°C möglich. Diese Möglichkeit wurde im Messzeitraum allerdings nicht umgesetzt.

Die Kälteverteilung mit Vorlauftemperatur des Kältekreises von 18°C ist über einen Wärmeträger hydraulisch von den restlichen Komponenten des Systems getrennt. Sie dient zur Versorgung der fünf in Abbildung 5 aufgelisteten

Kältekreise, sowohl für die Klimakälteversorgung des Gebäudes als auch für die Kühlung des Serverraums und zur Prozesskälteversorgung der Labore.

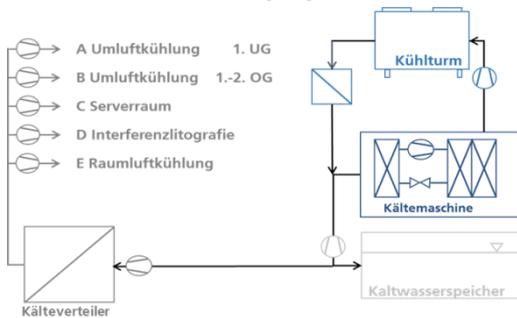


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Kälteversorgung des Laborgebäudes

Für die Laborarbeitsvorgänge ist eine unterbrechungsfreie Kälteversorgung unabdingbar. Um diese sensiblen Prozesse nicht zu beeinflussen und Lastschwankungen ausgleichen zu können, wurde ein 500m³ Kaltwasserspeicher als Puffer für die Kälteversorgung konzipiert, der in Form eines abgedichteten Raumes im 2. Untergeschoss des Gebäudes integriert wurde. Dieser groß dimensionierte Speicher bringt energetische und ökonomische Vorteile sowie gewisse regelungstechnische Freiheitsgrade mit sich. Durch intelligentes Energiemanagement könnten beispielsweise Lastspitzen zur Mittagszeit aus dem Speicher gespeist werden, ohne die KKM bei hohen Außentemperaturen und daraus resultierendem niedrigem Wirkungsgrad in Betrieb nehmen zu müssen. Aus der zeitlichen Entkopplung von Kälteabnahme und -bereitstellung ergibt sich ein hohes Lastverschiebungspotential, das sowohl für eine wirkungsgradtechnische Optimierung als auch für einen netzdienlichen Betrieb der Komponenten genutzt werden kann.

Messdatenbasierte Betriebsanalyse

Das Gebäude weist eine Mischnutzung (Labor, Werkstatt, Büro, Konferenz) auf. Abgesehen vom ganzjährig nahezu konstanten Kälteverbrauch des Serverraums sind die Kältelasten wie in Abbildung 6 witterungs- und jahreszeitenabhängig.

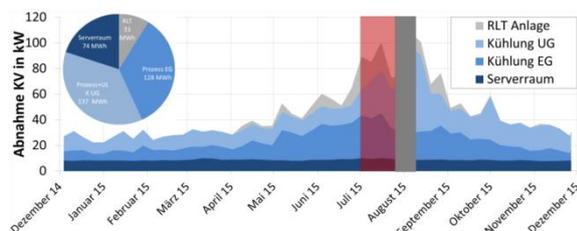


Abbildung 6: Jahresgang des Kälteverteilers gestapelt nach Einzelverbrauchern (rot: Störbetrieb, grau: Ausfall der Messtechnik); Kältemengen der Einzelverbraucher im Kreisdiagramm

Die Betriebsanalyse auf Basis der Messdaten für das Jahr 2015 ergab, dass der gemessene Kälteverbrauch

deutlich unter den in der Auslegungsphase angenommenen Werten liegt. Ein Grund hierfür ist, dass der geplante Anschluss an das Nahkältenetz, dessen Zweck unter anderem die Ausnutzung des Netzdienstlichkeitspotentials des betrachteten Gebäudes ist, noch nicht erfolgt ist. Auch der für einen höheren Bedarf ausgelegte Kaltwasserspeicher mit Speicherkapazität von ca. 2,8 MWh kann aufgrund des geringen Verbrauchs die mittleren Kältelasten rund zwei (im Sommer) bis vier (im Winter) Tage lang decken. Jahreszeitenabhängig ergeben sich gemessene Speicherverluste von 6,9% bis 9,2%.

Rund ein Drittel der erzeugten Kältemenge entfällt auf die Freie Kühlung, zwei Drittel auf die Kompressionskältemaschine. Die Energieeffizienz der Kältebereitstellung – insbesondere die der Freien Kühlung – hängt, wie in Abbildung 7 zu erkennen, stark von der Umgebungstemperatur ab. Wird die Freie Kühlung im Parallelbetrieb mit der KKM zum Vorkühlen des Fluids genutzt, erhöht sich die Energieeffizienz der KKM, bleibt jedoch unter den Werten der Freien Kühlung.

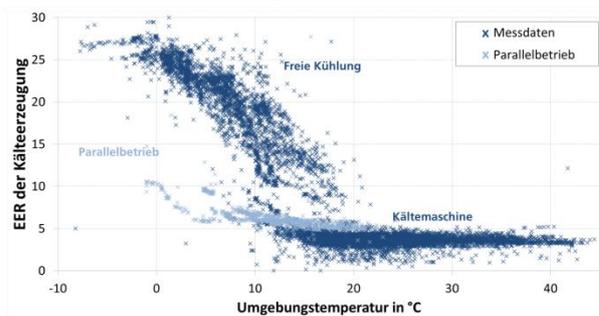


Abbildung 7: Temperaturabhängigkeit des EER der Kälteversorgungsanlagen

Modellbildung

Die thermische Leistung und der EER der Freien Kühlung hängen von der Umgebungstemperatur ab. Für den Temperaturbereich zwischen -3°C und 12°C kann aus der Punktwolke in Abbildung 7 der lineare Zusammenhang als Regressionsgrade empirisch ermittelt werden:

$$EER_{FK}(T_U) = -0,7986 \cdot T_U + 25,873$$

Die Modellgleichungen des Kühlturms resultieren aus der Näherung des EER und der maximalen Leistung:

$$zu: P_{el,FK}(T_U, \dot{Q}_{FK}) = \begin{cases} \frac{\dot{Q}_{FK}}{EER_{FK}(T_U)} & \text{für } T_U < 11,1^\circ C \\ 12,4 \text{ kW} & \text{für } T_U > 11,1^\circ C \end{cases}$$

Bei Temperaturen über 11,1°C läuft der zweipunktgeregelte Kühlturm mit seiner maximalen elektrischen Leistung von 12,4 kW_{el}. Zur Validierung kann der auf Basis der Modellgleichungen berechnete Jahresenergiebedarf der Freien Kühlung mit dem gemessenen Energiebedarf verglichen werden. Es ergibt sich über das Jahr gesehen eine Abweichung von 4,4% zwischen dem gemessenen und berechneten Energiebedarf.

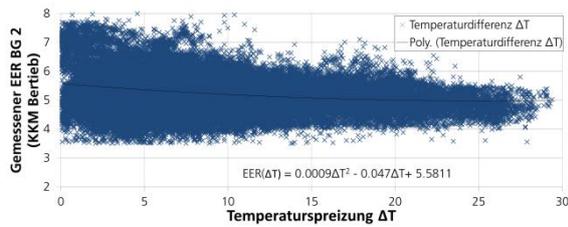


Abbildung 8: Kältemaschinenbetrieb über Temperaturspreizung und Regressionskurve

Das Modell für den Kältemaschinenbetrieb umfasst sowohl die Rückkühlung des Kühlturms als auch die KKM, hier nach dem Bilanzgrenzenverfahren mit BG2 bezeichnet. Es basiert auf dem Zusammenhang zwischen dem EER des Systems und der Temperaturspreizung ΔT zwischen Umgebungs- und Verdampfertemperatur, siehe Abbildung 8. Messwerte sowie die Approximation durch ein Polynom zweiten Grades ergeben die folgende Regressionskurve:

$$EER_{KKM}(\Delta T) = 0,0009 \cdot \Delta T^2 - 0,047 \cdot \Delta T + 5,811$$

Für das Modell ergibt sich über das Jahr gesehen eine Abweichung von 7,5%.

Integration von Freier Kühlung und Kältemaschine

Das Flussdiagramm in Abbildung 9 zeigt das Konzept, nachdem die maximale thermische Leistung berechnet wird, welche später in den Greedy Algorithmus eingebunden wird.

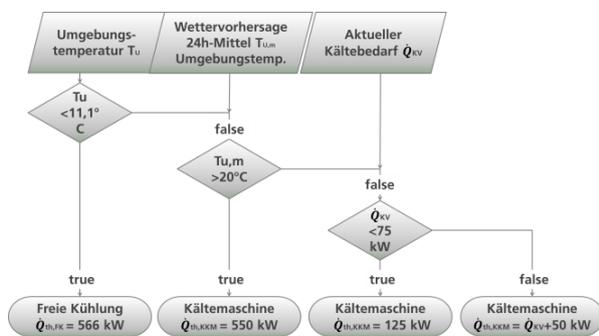


Abbildung 9: Regelschema zur Integration von Freier Kühlung und Kältemaschine

Berechnung Netzdienstlichkeitspotentiale

Um das Netzdienstlichkeitspotential des Laborgebäudes zu bewerten, werden im ersten Schritt die netzdienstlichen Kälteversorgungsstrategien berechnet und anschließend bezüglich verschiedener Kriterien ausgewertet. Aufgrund der Korrelation sowohl zwischen Residuallast (RES) und EEX-Preis als auch zwischen dem Anteil der Erneuerbaren Energien (Anteil EE) und dynamischen CO₂-Emissionsfaktor, wird nur die nach der Residuallast und die nach dem Anteil Erneuerbaren Energien optimierte Strategie berechnet. Als Datenbasis für die Netzsignale wird das Jahr 2019 ausgewählt, dessen Verlauf in Abbildung 2 dargestellt ist. Um die entstehenden Stromkosten für

die Kälteversorgung realistisch abzubilden, wird zusätzlich zum dynamischen EEX-Preis ein invarianter Fixkostenanteil von 20 Cent/kWh_{el} hinzuaddiert. Der energieeffiziente Betrieb wird mit dem gleichen Algorithmus durch Optimierung auf die günstigste Umgebungstemperatur berechnet.

Der berechnete Kälteversorgungsbetrieb für eine Sommer- und eine Frühlingswoche ist in Abbildung 10 und Abbildung 11 dargestellt.

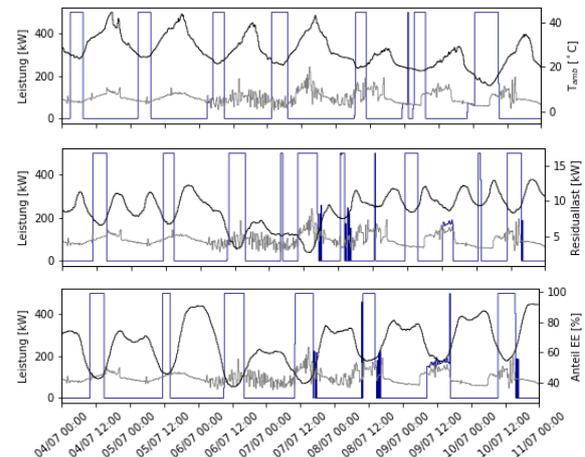


Abbildung 10: Kälteversorgung Sommerwoche optimiert nach Energieeffizienz (oberes Diagramm), RES (mittleres Diagramm) und Anteil EE (unteres Diagramm) mit zugehörigen Netzsignalen

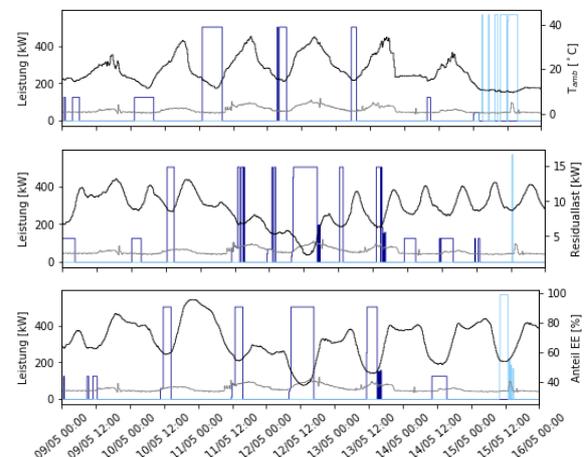


Abbildung 11: Kälteversorgung Frühlingswoche durch KKM (dunkelblau) und Freie Kühlung (hellblau) optimiert nach Energieeffizienz (oberes Diagramm), RES (mittleres Diagramm) und Anteil EE (unteres Diagramm) mit zugehörigen Netzsignalen

Während der energieeffiziente Betrieb den Speicher immer nachts auflädt, geschieht dies im netzdienstlichen Anteil EE-optimierten Betrieb immer mittags. Der netzdienstliche RES-optimierte Betrieb lädt den Speicher vorrangig auch zur Mittagszeit und teilweise nachts. In der kühleren Frühlingswoche setzt die energieeffiziente Betriebsweise die Freie Kühlung wann immer möglich zur Kälteversorgung ein. Bei den netzdienstlichen Strategien ist dies deutlich seltener

der Fall. Die warme Sommerwoche mit hohen Temperaturen nachts verhindert einen alleinigen Kühlturbetrieb da dieser in der Gebäuderegulierung nur bis zu einer Temperatur von 11,1°C umgesetzt wurde.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 ausgewertet. Der Realbetrieb (Spalte 1) und der energieeffiziente Betrieb (Spalte 2) zeigen ein netzneutrales Bezugsverhalten hinsichtlich aller Referenzgrößen. Die nichtoptimierte Regelung des Realbetriebs setzt die Freie Kühlung nur wenig zur alleinigen Kälteversorgung ein und hat einem hohen Stromverbrauch, Gesamtkosten und CO₂-Ausstoß. Durch eine Optimierung des Bezugsverhaltens auf die Umgebungstemperatur wird im energieeffizienten Betrieb die Freie Kühlung (Spalte 2) möglichst viel eingesetzt um den Speicher nachts zu laden. Dadurch sinken Stromverbrauch, die abgeschätzten Stromkosten und CO₂-Ausstoß signifikant um jeweils 32%, 24% und 16%. Die auf die Netzreferenzgrößen RES (Spalte 3) und Anteil EE (Spalte 4) optimierten netzdienlichen Strategien führen zu Strom- und Kosteneinsparungen von 4-12% gegenüber dem Realbetrieb. Bei den CO₂-Emissionen sparen dagegen die netzdienlichen Betriebsweisen mit ca. 30% fast doppelt so viel wie der energieeffiziente Betrieb gegenüber dem Realbetrieb.

Das Netzdienlichkeitspotential des Gebäudes zeigt sich nach Auswertung des vorgestellten Bewertungskriteriums. Die beiden netzdienlichen Betriebsstrategien können die Netzdienlichkeit des Gebäudes signifikant steigern, je nach Strategie und Netzsignal um ca. 20-30%. Für die netzdienliche RES-optimierte Strategie bedeutet dies z.B., dass der Strom im Mittel zu einem 32% netzdienlicheren Wert der Residuallast als der Durchschnitt bezogen wird ($GSC(RES)=0,68$). Auch hinsichtlich aller anderen Netzsignale verbessert sich die Netzdienlichkeit erheblich.

In der RES-optimierten netzdienlichen Regelung wird gleichzeitig der EEX-Börsenstrompreis minimiert. Der geringe variable Kostenanteil hat durch die hohen Fixkosten allerdings nur wenig Einfluss auf die Gesamtkosten. Ein Vergleich zeigt, dass die netzdienlichen Regelungen (Spalte 3 und 4) im konkreten Fall des untersuchten Objekts einen signifikanten Mehrverbrauch im Vergleich zur effizienzoptimierten Regelung verursachen. Solche Effizienzeinbußen sollten bei der Nutzung von Flexibilitätsoptionen für einen netzdienlichen Betrieb nach Möglichkeit aber nur in geringem Maße auftreten. Die Ziele „Netzdienlichkeit hinsichtlich Residuallast“ und „Energieeffizienz“ sind für eine Kälteversorgung mit luftgekoppelter Kältemaschine und Freier Kühlung jedoch bereits heute gut vereinbar, wie die kombinierte Betriebsstrategie (Spalte 5) zeigt. Dies resultiert daraus, dass der geringste Börsenstrompreis in den Morgenstunden erzielt wird,

in denen auch die stark temperaturabhängigen Erzeuger aufgrund der niedrigen Außenlufttemperaturen ihre maximale Effizienz erreichen. Andere Ziele, wie die Netzdienlichkeit hinsichtlich des Anteils der Erneuerbaren Energien, die den Stromverbrauch in der Mittagszeit erhöhen, gehen mit großen Effizienzeinbußen einher. Aus diesem Grund ist eine solche kombinierte Regelung aus energetischer Sicht nicht ratsam. Eine kombinierte Regelung (Spalte 6) aus allen drei Zielstellungen „Netzdienlichkeit hinsichtlich Residuallast und Anteil der Erneuerbaren Energien“ und „Energieeffizienz“ ist dagegen empfehlenswert, insbesondere da sie für alle Netzreferenzgrößen eine gleichermaßen netzdienlich ist.

FAZIT UND AUSBLICK

In diesem Artikel wurde eine einfache Methode beschrieben, das Netzdienlichkeitspotential der Kälte- bzw. Wärmeversorgung eines Gebäudes zu bestimmen. Ein detaillierter Modell- und Regelungsentwurf ist nicht notwendig. Die Methodik erlaubt sowohl die Betrachtung mehrerer alternativer Wärme- oder Kälteerzeuger als auch die Berücksichtigung mehrerer gleichermaßen wichtiger Zielkriterien. Die Berechnung wurde beispielhaft anhand eines modernen Laborgebäudes mit Mischnutzung gezeigt. Das Demonstrationsgebäude bietet aufgrund der für einen höheren Verbrauch ausgelegten Kälteerzeuger, dem ganzjährigen Kühlbedarf als auch dem großen Wasserspeicher ein großes Effizienzsteigerungs- und Netzdienlichkeitspotential. Die Berechnungen ergaben, dass durch eine gezielte Beeinflussung der Stromlast in Abhängigkeit der Netzreferenzgrößen „Residuallast“ und „Anteil der Erneuerbaren Energien am Strommix“ der Strom im Mittel zu einem 10% bis 30% günstigerem Wert hinsichtlich der Netzsignale bezogen wird. Um einen hohen Mehrverbrauch und Effizienzeinbußen zu verhindern, wurden zwei kombinierte Regelungen berechnet. Gegenüber dem energieeffizienten Betrieb führen diese nur zu einem geringen Mehrverbrauch. Gegenüber dem auf Messdaten basierenden Realbetrieb resultieren sie dagegen in hohe Energie- und CO₂-Emissionseinsparungen. Insbesondere die Ziele „Netzdienlichkeit hinsichtlich Residuallast“ und „Energieeffizienz“ sind für eine Kälteversorgung mit luftgekoppelter Kältemaschine und Freier Kühlung gut vereinbar. Perspektivisch ist der Anschluss des betrachteten Gebäudes an ein intelligentes Nahkältenetz geplant. Mit dem großen ermittelten Lastverschiebepotential soll das Gebäude den netzdienlichen und energieeffizienten Betrieb innerhalb des Labor- und Bürogebäudeverbundes unterstützen.

Tabelle 1: Vergleich Realbetrieb mit simulierten energieeffizienten (EFF) Betrieb mit netzdienlichen Betrieb (optimiert nach Residuallast (RES) und Anteil Erneuerbarer Energien (EE) bzw. Kombination)

	REAL-BETRIEB	EFFIZIENZ OPT.	RES OPT.	Anteil EE OPT.	EFF+RES OPT.	EFF+Anteil EE+RES OPT.
Kälteenergie [MWh_{th}]						
Kältemaschine	290,2	188,5	255,7	270,3	215,1	247,5
Freie Kühlung	124,4	232,6	165,3	150,7	206,0	173,4
Strombezug [MWh_{el}]						
Kältemaschine (BG2)	55,2	35,7	48,7	51,6	40,9	47,2
Freie Kühlung	5,9	10,5	7,9	7,3	9,7	8,2
Gesamt	61,0	46,1	56,6	58,9	50,6	55,4
Vgl. mit Realbetrieb		-32%	-8%	-4%	-21%	-10%
Vgl. mit Effizienzbetrieb	+24%		+19%	+22%	+9%	+17%
JAZ						
Kältemaschine (BG2)	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3
Freie Kühlung	21,3	22,2	21,0	20,6	21,2	21
Gesamt	6,8	9,1	7,4	7,1	8,3	7,9
Netzdienlichkeit						
Gesamtkosten [€]	14481	10956	12737	13436	11432	12544
Vgl. mit Realbetrieb		-24%	-12%	-7%	-21%	-13%
Vgl. mit Effizienzbetrieb	+32%		+16%	+23%	+4%	+14%
CO ₂ -Emission [t]	23902	19958	16536	16174	17071	15311
Vgl. mit Realbetrieb		-16%	-31%	-32%	-28%	-36%
Vgl. mit Effizienzbetrieb	+19%		-18%	-19%	-14%	-24%
GSC _{abs} (RES)	0,99	1,03	0,68	0,74	0,73	0,70
GSC _{abs} (EEX)	0,98	0,99	0,67	0,75	0,69	0,70
GSC _{abs} (Anteil EE)	0,99	1,10	0,82	0,75	0,93	0,77
GSC _{abs} (CO ₂)	0,99	1,08	0,73	0,69	0,85	0,69

DANKSAGUNG

Das Projekt FlexControl wurde unter dem Förderkennzeichen 03ET1359A mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie gefördert.

LITERATUR

Bundesnetzagentur. 2018. SMARD – Strommarktdaten. Online abrufbar unter <https://www.smard.de/page/home/marktdaten/>.

Bachseitz, M., Koenigsdorff, R. 2018. Modellprädiktiver, netzdienlicher Betrieb von Supermärkten, BauSIM.

EPEX SPOT Day-Ahead-Preise. 2019. Online abrufbar unter <http://www.epexspot.com/de/marktdaten/dayaheadauktion>.

Klein, K., Langner, R., Kalz, D., Herkel, S., Henning, H.-M. 2016. Grid support coefficients for electricity-based heating and cooling and field data analysis of present-day installations in Germany, Applied Energy 162: 853-67.

Klein, K., Herkel, S., Henning, H.-M., Felsmann, C. 2017. Load shifting using the heating and cooling system of an office building: quantitative potential evaluation for different flexibility and storage options, Applied Energy 203: 917-37.

ENTWICKLUNG VON QUALITÄTSSTANDARDS FÜR DIE ENERGETISCHE GEBÄUDE- UND ANLAGENSIMULATION ALS PLANUNGSWERKZEUG

A. Nouri¹, A. Nicolai², B. Krämer¹, S. Hirth², J. Agudelo³, C. Seifert⁴, A. Malhotra¹,
M. Madjidi³, J. Frisch¹ und C. van Treeck¹

¹RWTH Aachen University, Institute of Energy Efficiency and Sustainable Building (E3D),
Germany

²Institute of Building Climatology (IBK), TU Dresden, Germany

³Fachbereich Energie- und Gebäudetechnik, Hochschule München, Germany

⁴Innius DÖ GmbH, Germany

KURZFASSUNG

Heutzutage werden Simulationsmethoden im Kontext der thermisch-energetischen Gebäude- und Anlagensimulation und Bauphysik in Forschung sowie Praxis angewendet. Ein wesentlicher Bestandteil der Entwicklung von Gebäudesimulationsprogrammen ist dabei die Durchführung eines Validierungs- und Diagnoseverfahrens, um die Plausibilität der Simulationsergebnisse zu garantieren und Simulationsfehler weitestgehend zu minimieren oder gänzlich auszuschließen. Das vom deutschen Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderte Forschungsprojekt „SimQuality“ beschäftigt sich dabei mit der Entwicklung von Qualitätsstandards für die energetische Gebäude- und Quartierssimulation. Dabei werden verschiedene Testfälle, aufbauend auf bereits etablierten Testszenarien wie dem BESTEST (Building Energy Simulation Test), und Tests aus Normen definiert und mit unterschiedlichen Simulationsprogrammen Vergleichsrechnungen durchgeführt. Im Projekt werden die Programme Modelica/Dymola, NANDRAD, THERAKLES, IDA ICE, TRNSYS, TAS und ETU-Simulation verwendet. Ebenfalls Forschungsbestandteil sind die Entwicklung einer Auswertungsmethodik und Prüfkriterien. Das Ziel des Projektes ist es, Qualitätsstandards für Simulationsanwendungen zu definieren und in die Planungspraxis zu transferieren. In diesem Beitrag werden die grundlegenden Methoden sowie erste Ergebnisse vorgestellt.

ABSTRACT

Nowadays, simulation methods in the context of building and HVAC system performance simulation and building physics are widely used in research and practice. An integral part of the development of building simulation programs is the implementation of a validation and diagnostic procedure in order to ensure the plausibility of the simulation results and to minimise or exclude simulation errors as far as possible. The research project “SimQuality”, funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs

and Energy (BMWi), deals with the development of quality standards for building and district energy performance simulation. Various test cases based on already established test series such as BESTEST (Building Energy Simulation Test) and different building codes are defined and comparative analyses are conducted. Within the project the simulation tools Modelica/Dymola, NANDRAD, THERAKLES, IDA ICE, TRNSYS, TAS and ETU-Simulation are used. A further research aspect is the development of an evaluation methodology and compliance criteria. The objective of this project is to define quality standards for simulation applications and to transfer them into planning practice. In this article, the fundamental methods as well as first results are presented.

EINLEITUNG

Laut Statistik entfallen weltweit etwa 40% des Gesamtenergieverbrauchs auf den Gebäudesektor (Harish und Kumar 2016). Auch durch die verschärften Energieeffizienzforderungen der ENEC stehen Gebäudeperformance und Energieeffizienz im Fokus der Planungspraxis. Die derzeit verfügbare Rechenkapazität ermöglicht die Simulation komplexer, realer Systeme, die bis vor kurzem als unmöglich zu modellieren galten. Die Gebäudesimulation bietet eine leistungsstarke Methode zur dynamischen Untersuchung des thermischen Verhaltens von Gebäuden. Thermisch-energetische Gebäudesimulationstools werden zunehmend in Forschung und Planungspraxis eingesetzt, um die Gebäudeperformance sowie die thermische Behaglichkeit der Nutzer zu evaluieren. Die Simulationswerkzeuge unterstützen dabei das Verständnis der Funktionsweise eines Gebäudes nach bestimmten Kriterien und ermöglichen den Vergleich verschiedener Design-Alternativen. Die Simulationsergebnisse dienen als Grundlage für bedeutende Entscheidungen mit deren Hilfe die energetisch bestmögliche Option identifiziert werden kann. Aufgrund der Komplexität von Simulationsmodellen und deren Eingaben kann es jedoch schwierig sein, die Validität der Ergebnisse nachzuweisen und Mängel in

der Berechnungsmethode oder deren Implementierung festzustellen. Bereits kleinere Programmierfehler im Programmcode können zu schwerwiegenden Fehlern führen. Deshalb ist es wichtig, dass die Simulationstools gründlich überprüft werden, um die Genauigkeit der Ergebnisse sicherzustellen. Validierung ist hierbei ein notwendiger Bestandteil der Entwicklung von Gebäude- und Anlagensimulationsprogrammen und garantiert die Qualität sowie Reproduzierbarkeit der Ergebnisse durch Beseitigung von Programm- und sonstigen physikalische Fehlern. Da Simulationsprogramme zahlreiche Codezeilen und verzweigte/bedingte Berechnungsteile enthalten, ist die Funktionalität sinnvoll in spezifischen Testfälle zu prüfen. Der vorliegende Beitrag stellt die grundlegenden Methoden sowie erste Validierungsergebnisse von zwei aktuell laufenden Testfällen, „Sonnenstandsberechnung“ und „Solarstrahlungsberechnung“ im Rahmen des Projektes SimQuality vor.

GEBÄUDE- UND ANLAGENSIMULATIONSTOOLS

Aktuell stehen eine Vielzahl von Gebäude- und Anlagensimulationsprogrammen zur Verfügung (BEST Directory 2020). Gebäude- und Anlagensimulationstools ermöglichen die dynamische Berechnung des thermischen und energetischen Verhaltens von Gebäuden und ermitteln den Energiebedarf, um bestimmte Kriterien für die Gebäudeperformance (zum Beispiel die Raumtemperatur und die Luftfeuchtigkeit) unter dem Einfluss externer Faktoren wie Wetter, Nutzerverhalten und Infiltration aufrechtzuerhalten. Die Simulationen werden in diskreten Zeitschritten, üblicherweise für ein ganzes Jahr oder einen bestimmten Lastenzyklus durchgeführt. Für die Modellierung und Berechnung der Wärmeübertragung in Gebäuden werden verschiedene Methoden wie Finite-Differenzen, Finite-Volumen-Methode, Finite-Elemente-Methode, Ersatzmodell- und Gewichtsfaktorenmethoden verwendet (Hensen und Lamberts 2011, Kämpf und Robinson 2007, VDI 6020). Im Rahmen des Forschungsprojektes SimQuality werden unterschiedliche Gebäude- und Anlagensimulationstools benutzt, um die Validierung durch Vergleichsrechnungen methodenübergreifend durchzuführen. Im Folgenden werden kurz einige verwendete Programme detaillierter erläutert.

Modelica/Dymola

Modelica ist eine gleichungsbasierte, objektorientierte Modellierungssprache für die Modellierung des dynamischen Verhaltens komplexer multiphysikalischer Systeme, die von Differentialgleichungen, algebraischen Gleichungen und

diskreten Gleichungen beschrieben werden (Mattsson und Elmqvist 1997). Modelica wird zunehmend als Modellierungssprache für die thermischen Gebäude- und Anlagensimulation eingesetzt, ist jedoch aufgrund der Komplexität der Programmierung und Modellierung vornehmlich in Forschung und Modellprototypenentwicklung präsent. Modelica-Modelle benötigen zur Ausführung eine Laufzeitumgebung. Es existieren verschiedene Open-Source-Simulationsumgebungen wie JModelica und OpenModelica sowie kommerzielle Simulationsumgebungen wie Dymola und SimulationX existieren, welche in Modelica implementierten Systemmodelle simulieren und die Modellierung unterstützen (Modelica Association 2020). Es existieren bereits mehrere Modelica-Bibliotheken für die thermische Gebäude- und Anlagensimulation. Im IEA EBC Annex 60 wurde die Open-Source Annex 60 Modelica-Bibliothek vor kurzem umbenannt in die „Modelica IBPSA Bibliothek“ (IBPSA Project 1), die mehr als 300 Modelica-Modellen für Gebäude und kommunale Energiesysteme enthält und unter <https://github.com/-ibpsa/modelica-ibpsa> verfügbar ist (Wetter und van Treeck 2017). Diese Modellbibliothek dient als Kernstück für vier Bibliotheken Buildings (Wetter et al. 2014), AixLib (Müller et al. 2016), BuildingSystems (Nytsch-Geusen et al. 2013) und IDEAS (Baetens et al. 2015). Desweiteren existieren kommerzielle Bibliotheken mit Fokus auf Gebäude- und Anlagensimulation (EA Systems 2020). Im Forschungsprojekt SimQuality wird die Simulationsumgebung Dymola in Kombination mit der AixLib Bibliothek verwendet. Da Fehlerquellen sowohl in der Modelica-Bibliothek als auch der Simulationsumgebung liegen können (oder auch in der Interaktion zwischen beiden) ist das Ergebnis der Funktionsprüfung immer für die Kombination aus Modellbibliothek und ausführender Simulationsumgebung zu verstehen.

NANDRAD

Seit 2012 wird am Institut für Bauklimatik (IBK) der Technischen Universität Dresden eine eigene Gebäudesimulationsplattform zur dynamischen Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden entwickelt (Nicolai und Paepcke 2012). Die Plattform wurde speziell durch die Verwendung generischer Modelle entwickelt, um große Datenmengen ohne Redundanzen und damit große Gebäude (> 100 individuell bilanzierte Zonen) effizient erfassen und auswerten zu können. Modellseitig wird dabei die schwere Bauweise berücksichtigt, die im europäischen Raum auftritt. Die verwendeten physikalischen Modelle weisen eine hohe Detailtreue auf, die für dynamische Prozesse unverzichtbar ist. Dabei kann NANDRAD für die Gebäudeenergiesimulation zur Jahresendenergiebedarfs-

berechnung, zur Simulation der thermischen Behaglichkeit und Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes, sowie für die Anlagenauslegung und -simulation verwendet werden. Hierfür unterstützt NANDRAD zusätzlich moderne Kopplungstechnologien wie FMI (FMI 2019). Dadurch kann die Simulation detaillierter Anlagensysteme und Komponenten im Erzeugerbereich von dafür spezialisierten Programmen mit der NANDRAD-Gebäudesimulation kombiniert werden. Damit sind die Anwendungsfälle der Plattform äußerst weitreichend und vielfältig (NANDRAD 2020).

IDA ICE

IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) ist ein energetisches Gebäude- und Anlagensimulationstool, basierend auf der IDA-Simulationsumgebung zur dynamischen Mehrzonensimulation des Innenraumklimas, der thermischen Behaglichkeit und des Energiebedarfs. Bauphysikalische Modelle und mathematische Gleichungen können entweder in Neutral Model Format (NMF) oder in der Modelica-Modellierungssprache entwickelt werden (EQUA Simulation AB 2020, Crawley et al. 2008). Der schwedischen Normung geschuldet, bei der die Gebäudeenergieeffizienz im gebauten Gebäude evaluiert und bewertet wird (anstelle von Vergleichs- und Prognoserechnungen in der deutschen Norm), werden mit IDA ICE geplante Gebäude bereits seit langem in der Praxis validiert. Entsprechend besteht in der Planungspraxis ein hohes Vertrauen in die Genauigkeit der Simulationsergebnisse mit IDA ICE.

TRNSYS

TRNSYS ist eine modular aufgebaute Software zur Simulation von Energiesystemen und eignet sich gut für detaillierte Analysen eines zeitabhängigen Systems. Die Software bietet eine graphische Benutzeroberfläche und basiert auf der Programmiersprache FORTRAN. Die TRNSYS-Modellbibliothek enthält die üblichen Komponenten zur Simulation von thermischen und elektrischen Energiesystemen sowie die Schnittstellen zur Eingabe von Wetterdaten und Ausgabe von Simulationsergebnissen. In einer TRNSYS-Simulation können sowohl die Komponenten eines Energiesystems definiert, als auch die Art und Weise, wie die bestimmten Komponenten miteinander verbunden sind, spezifiziert werden. Darüber hinaus ermöglicht TRNSYS mithilfe einer speziellen Schnittstelle (TRNBuild) die Durchführung einer thermischen Analyse eines detaillierten Multizonen-Gebäudemodells (Klein et al. 2006). Kernkompetenz der TRNSYS Software ist die Abbildung von Energiesystemen und Anlagenkomponenten mit Bezug zu solaren Lasten.

ETU-Simulation

ETU ist eine gekoppelte Gebäude- und Anlagensimulationssoftware von Hottgenroth/ETU zur energetischen Planung und Optimierung. Das Programm bietet Leistungen wie thermische Gebäudesimulation, sommerlicher Wärmeschutz, KWK-Anlagensimulation, Wärmepumpen und Photovoltaik-Anlagensimulation an (Hottgenroth Software 2020). Die Software des SimQuality-Projektpartners befindet sich derzeit in Entwicklung.

VALIDIERUNGSMETHODEN

Der Modellierungsprozess ist mit zahlreichen Unsicherheiten bzw. Fehlerquellen, wie variierende Wetterdaten, thermische Eigenschaften von Materialien, Nutzerverhalten und Rechenalgorithmen verbunden. Diese Quellen von Unsicherheiten können einen wesentlichen Einfluss auf die Simulationsergebnisse haben. Mit wachsendem Anteil der Gebäudesimulationswerkzeugen im Planungsprozess steigt der Bedarf an der Qualitätssicherung kontinuierlich. Qualitätsstandards sollen Stabilität, Vergleichbarkeit und höchstmögliche Zuverlässigkeit der Ergebnisse ermöglichen. Um die Genauigkeit und Realitätsnähe der Simulationsergebnisse nachzuweisen, sollten die Funktionalitäten der Simulationswerkzeuge vor ihrer praktischen Anwendung mit Hilfe von Validierungsverfahren nachgewiesen werden. Im Kontext der energetischen Gebäude- und Anlagensimulation können die Validierungsmethoden in drei Gruppen eingeteilt werden: empirische Validierung, analytische Verifikation und Vergleichstests (Judkoff et al. 2008). Bei der empirischen Validierung werden Berechnungsergebnisse eines Simulationstools mit gemessenen Daten bzw. empirischen Ergebnissen aus realen Experimenten (z.B. einem bestehenden Gebäude oder Prüfstand) verglichen. Dabei treten unterschiedliche Quellen von Unsicherheiten bei Messung, Messdatenauswertung und Interpretation von Messdaten, Modellbildung und Parametrisierung des Simulationsmodells bis zum Vergleich von Simulationsergebnissen und Messdaten auf. Durch die analytische Verifikation werden Simulationsergebnisse eines Programmes mit den Ergebnissen einer analytischen/quasianalytischen Lösung verglichen. Diese Methode beschränkt sich jedoch auf bestimmte idealisierte Fälle unter sehr einfachen und spezifische Randbedingungen. Bei dem Vergleichstest werden Ergebnisse verschiedener Simulationstools untereinander verglichen. Dabei wird ein spezifischer Testfall mit beliebiger Komplexität definiert und die gleichen Eingangsdaten für alle Simulationsprogramme verwendet.

NORMEN UND STANDARDS

Zur Validierung von thermisch-energetischen Gebäude- und Anlagensimulationsprogrammen existieren verschiedene Normen und Richtlinien, in denen unterschiedliche Testfälle zur Gültigkeitsprüfung der Simulationsergebnisse festgelegt sind. Dazu zählen unter anderem VDI 6007, VDI 6020 sowie ASHRAE Standard 140, welche nachfolgend kurz beschrieben werden.

Die Richtlinie VDI 6020 legt die Mindestanforderungen an Rechenverfahren zur thermisch-energetischen Beurteilung von der Gebäude- und Anlagensimulation fest und stellt die Einhaltung der Anforderungen durch Validierungsverfahren sicher. Diese Richtlinie steht in direktem Zusammenhang mit der Norm VDI 6007, welche das Verfahren (Modellbildung und Algorithmen) zur Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden (Heiz- und Kühllast, Raumtemperatur) beschreibt. Die Referenzergebnisse werden mit einer Referenzimplementierung der Modellgleichungen erstellt, welche individuelle Annahmen und Vereinfachungen enthält. Dabei ist zu beachten, dass diese zum Teil inkompatibel mit gängigen Modellannahmen anderer Gebäudeenergiesimulationen sind, und sich daher für die Validierung im SimQuality-Projekt nicht eignen.

Die Norm ASHRAE Standard 140, herausgegeben von der American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), dient als Standardmethode für die Bewertung energetischer Gebäude- und Anlagensimulationsprogramme und basiert auf dem BESTEST (Building Energy Simulation Test). Verschiedene Einraummodelle werden unter definierten Randbedingungen festgelegt, die sich im Konstruktionsaufbau (leichte oder schwere Bauwerksmasse) unterscheiden. Außerdem wird die Kühl- und Heizleistung sowohl als analytischer Verifikationstest als auch als Vergleichstest untersucht (ANSI/ASHRAE Standard 140 2017).

METHODIK

Die Testfälle der zitierten Normen haben verschiedene Schwachstellen, bzw. verschmelzen verschiedene Modellkomponenten, sodass eine Zuordnung einer beobachteten Abweichung zu der betreffenden fehlerhaften Modellkomponente nicht möglich ist. Im Rahmen des Forschungsprojekts „SimQuality“ werden daher verschiedene Testfälle neu definiert, die sich inhaltlich an den genormten Testfällen orientieren. Die Testfälle prüfen individuell verschiedene Modellkomponenten (Wettereinflüsse, Wärmeleitung- und Speicherung, Lüftung und Klimatisierung). Jeder Testfall wird in unterschiedlichen Simulationsprogrammen modelliert und in Stundenschritten für das gesamte Jahr sowie in

Minutenschritten für ausgewählte Tage simuliert. Diese sind so gewählt, dass charakteristische Ergebnisse und mögliche Berechnungsfehler gut erkannt werden können, ohne dass jeweils eine sehr zeitaufwändige Prüfung des gesamten Datensatzes erfolgen muss. Die verwendeten Eingangsdaten werden detailliert vorgegeben. Die Validierung wird durch Vergleichsrechnungen durchgeführt, wobei die Berechnungsergebnisse aller Simulationstools mit Referenzergebnissen verglichen werden. Wenn Abweichungen zwischen den Ergebnissen auftreten, muss die Quelle der Differenz identifiziert und ggfs. korrigiert werden. Dieses Grundkonzept der Validierungsmethodik ist in Abbildung 1 dargestellt. Diese Methodik bietet sich für die Testfälle an, bei denen bauphysikalische Modelle inkrementell abgebildet werden können und sich Differenzen zwischen Modellvarianten klar in den Berechnungsergebnissen zeigen.

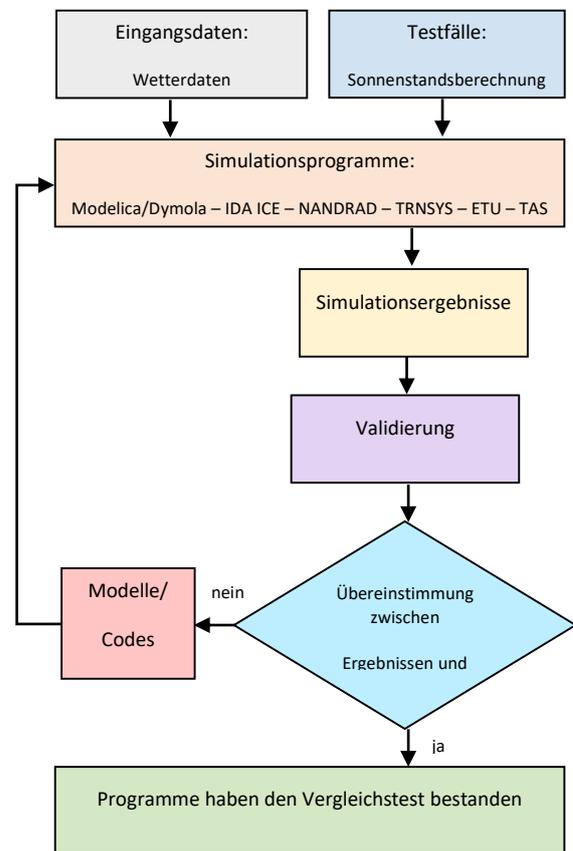


Abbildung 1: Validierungsmethodik

MODELLIERUNG UND SIMULATION

Für die Evaluierung der unterschiedlichen energetischen Gebäude- und Anlagensimulationswerkzeuge werden verschiedene Testfälle definiert. In diesem Beitrag werden zwei Testfälle „Sonnenstandsrechnung“ und „Solarstrahlungsberechnung“ sowie die Testergebnisse vorgestellt.

Testfall 1: Sonnenstandsberechnung

Eine wesentliche Anwendung von Gebäudeenergiesimulationsprogrammen ist die Prüfung des sommerlichen Wärmeschutzes. Dafür ist die Berechnung solarer Lasten eine wichtige Teilaufgabe des Simulationsmodells. Der Testfall 1 überprüft die Funktionalität des Simulationsprogrammes bzw. des Modells in Bezug auf die Ermittlung der Sonnenstandsberechnung. Der Sonnenstand wird durch Sonnenhöhenwinkel (Altitude) und Sonnenrichtungswinkel (Azimut) beschrieben. Es existieren eine Vielzahl unterschiedlicher Formulierungen für die Berechnung dieser Größen. Unterschiede bestehen u.a. in Berücksichtigung der wahren Ortszeit und Längengradkorrektur, sowie der Definition des Azimuthwinkels. Letzterer wird in einigen Programmen (Dymola/AixLib, IDA ICE) für die Nordhalbkugel in Südrichtung mit 0° definiert (vergl. Duffie & Beckman, 1974), während die Mehrzahl der im Projekt geprüften Programme ortsunabhängig die Nordrichtung mit 0° definieren (vergl. DIN 5034-2 Grundlagen). Letzteres hat den Vorteil, dass keine Sonderbehandlung südlich des nördlichen Wendekreises im Gleichungssatz notwendig ist. Dies ist eine mögliche Fehlerquelle, welche im Testfall 1 durch Wahl verschiedener Standorte auf der Weltkugel ausgeschlossen wird.

Der Sonnenstand wird in den Simulationstools Modelica/AixLib, NANDRAD, Radiance, IDA ICE, TRNSYS, ETU-Simulation, und TAS modelliert und für 8 Standorte auf dem Globus (Barrow, Denver, Lima, Potsdam, Shanghai, Kaxgar, Singapur und Melbourne) im Tagesverlauf berechnet. Die Standorte sind so gewählt, dass die korrekte Implementierung von Fallunterscheidungen geprüft wird (z.B. Nord- und Südhalbkugel, innerhalb oder außerhalb der Wende- und Polarkreise, sowie nahe oder entfernte Lage vom Bezugsmeridian).

Die Berechnung des Sonnenstands hängt vom Zeitpunkt sowie dem Standort des Betrachters ab. Eingangsdaten sind je Standort der Längengrad, der Breitengrad und die Zeitzone. Der detaillierte Überblick über die verwendeten Programme und Standorte ist in den Tabellen 1 und 2 dargestellt.

Testfall 2: Solarstrahlungsberechnung

Im Testfall 2 wird die Berechnung der solaren Lasten auf unterschiedlich geneigte und ausgerichtete Flächen geprüft. Dabei wird ein Berechnungsmodell im jeweiligen Simulationsprogramm erstellt und für den Standort Potsdam simuliert. Bei diesem Standort treten im Jahresverlauf deutlich unterschiedliche Strahlungsbelastungen auf Nord- und Südoberflächen auf. Das Testgebäude enthält Wandflächen in 8 Himmelsrichtungen und Neigungen 90° und 30°

sowie der Horizontalfläche. In Tabelle 3 sind die zu verwendenden Himmelsrichtungen aufgelistet. Die absorbierte direkte und diffuse Strahlung (bzw. Globalstrahlung) auf die einzelnen Flächen werden in Stundenschritten für das gesamte Jahr sowie in Minutenschritten für 5 Tage protokolliert. Bei der Berechnung der diffusen Strahlung wird zwischen zwei Modellansätzen unterschieden: einem isotropen Modell und einem anisotropen/richtungsabhängigen Modell. Bei dem isotropen Diffusstrahlungsmodell wird davon ausgegangen, dass die Diffusstrahlungsintensität über den Himmel gleichmäßig verteilt ist (Maleki et al. 2017).

Tabelle 1: Verwendete Simulationsprogramme

Programm	Version
NANDRAD	1.4
AixLib/Dymola	0.7.3/2018
Radiance	5.2.0
IDA ICE	4.8.0.1
TRNSYS	18*
ETU-Simulation	4.1
TAS	9.3
THERAKLES	3.4.0

*Es wurde eine aktuelle Entwicklungsversion von TRNSYS verwendet, welche demnächst veröffentlicht wird.

Tabelle 2: Prüfstandorte für den Testfall 1

Standort	Längengrad [°]	Breitengrad [°]	Zeitzone
Barrow	-156.78	71.30	-9
Denver	-104.86	39.76	-7
Lima	-77.12	-12.00	-5
Potsdam	13.067	52.383	1
Shanghai	121.43	31.17	8
Kaxgar	75.98	39.47	8
Singapur	103.98	1.37	8
Melbourne	144.83	-37.67	10

Tabelle 3: Flächenausrichtungen für die Berechnung der Strahlungsintensität - Testfall 2

Himmelsrichtung	Richtungswinkel [°]
Norden	0
Nordost	45
Osten	90
Südost	135
Süden	180
Südwest	225
Westen	270
Nordwest	315

ERGEBNISSE UND VALIDIERUNG

Auswertung und Validierung Testfall 1 – Sonnenstandsberechnung

Alle verwendeten Tools implementieren die Berechnung des Sonnenstandes vergleichbar.

Zunächst wird eine Jahressimulation im Minutentakt durchgeführt und danach die Auswertungen bzw. Validierung für 5 verschiedene Tage (5. März, 27. Juli, 22. September, 24. Oktober und 17. Dezember) durchgeführt. Diese Tage wurden in Anlehnung an den ASHRAE Standard 140 ausgewählt.

Exemplarisch sind in Abbildung 2 die Simulationsergebnisse Sonnenhöhenwinkel (Altitude) sowie Sonnenrichtungswinkel (Azimut) für den Standort Denver vom 27. Juli dargestellt.

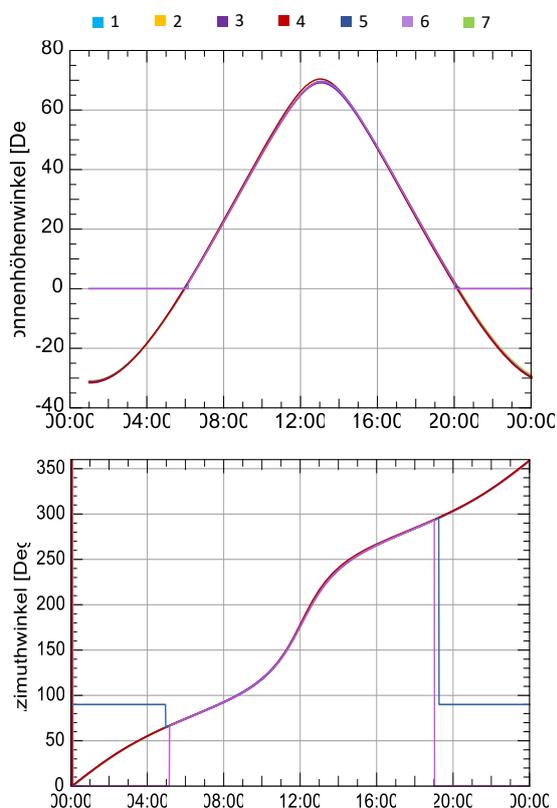


Abbildung 2: Sonnenhöhenwinkel (oben) und Sonnenrichtungswinkel (unten) - Standort Denver - 27. Juli

Die Simulationsprogramme 5 und 6 geben nur Sonnenhöhenwinkel und Azimutwinkel aus, wenn die Sonne über dem Horizont steht (bei Programm 6 erst ab einem Sonnenhöhenwinkel $> 2^\circ$). Zur Prüfung der Genauigkeit des im jeweiligen Simulationstools aufgebauten Sonnenstandmodells wird der Vektor des Sonnenstrahls für jeden untersuchten Zeitschritt (Minute, Stunde) aus dem angegebenen Azimut und Sonnenhöhenwinkel im kartesischen Koordinatensystem ermittelt. Anschließend wird der Winkel zwischen diesem Vektor und dem Vektor der Referenzergebnisse über das Skalarprodukt errechnet. Ein direkter Vergleich von Sonnenhöhenwinkel und Azimutwinkel ist nicht zielführend, da bei äquatornahen Standorten zur Tagesmitte starke Unterschiede des Azimutwinkels auftreten können, obwohl die Sonne nahezu im Zenit steht und damit die Sonnenrichtungsvektoren sehr ähnlich sind. Für den Vergleich wurde eine Toleranz von 3° für die erlaubte Winkelabweichung definiert.

Alle Programme blieben innerhalb dieser Toleranz, welches auf korrekt implementierte Sonnenstandsmodelle schließen lässt.

Bei Programm 5 gibt es kleinere Abweichungen, z.B. am Standort Barrow für mehrere Stunden am Morgen, bzw. bei einigen Standorten mehrere Minuten nach Sonnenaufgang bzw. vor Sonnenuntergang, an denen fehlerhafte Werte berechnet wurde. Da diese Abweichungen aber jeweils nur bei sehr kleinen Sonnenhöhenwinkeln auftreten, ist die Auswirkung auf die nachfolgend berechneten solare Lasten sehr klein (nur geringe Strahlungsintensitäten). Der Fehler am Standort Barrow (nördlicher Wendekreis) ist in der nächsten Version vom Programm 5 aber bereits behoben (bereits ein kleines Ergebnis des SimQuality-Tests). Bei Programm 1 wurde bei Azimutwinkeln, welche zur Tagesmitte die Nordausrichtung durchlaufen (d.h. von 360° bis 0° „springen“), durch lineare Interpolation zwischen den Integrationsschritten mitunter Werte im Bereich $100^\circ..180^\circ$ ausgegeben. Dieses sind jedoch nur Ausgabeeffekte, da in der Simulation zu jedem Solverzeitschritt mit korrekten Sonnenständen gerechnet wird. Dennoch ist dies für eine Verwendung des Azimutwinkels in Folgeberechnungen zu beachten.

Alle getesteten Programme bestehen damit den Testfall 1.

Auswertung und Validierung Testfall 2 - Solarstrahlungsberechnung

In diesem Testfall werden die Programme Modelica/AixLib, TRNSYS, NANDRAD und THERAKLES für das isotrope Diffusstrahlungsmodell und THERAKLES, IDA ICE, TRNSYS und ETU-Simulation für das anisotrope Diffusstrahlungsmodell (Perez-Modell) verwendet.

Zunächst wird die jährlich auftreffende Solarstrahlungsenergie betrachtet. Abbildung zeigt die berechnete Globalstrahlung (Gesamtenergie) für beide Diffusstrahlungsmodellvarianten. Während die Programme 1, 2, 3, 5 und 8 nahezu identische Ergebnisse liefern, weicht das Programm 7 zum Teil deutlich ab. Um die Unterschiede zwischen den Programmen genauer bewerten zu können, werden die Strahlungslastverläufe an verschiedenen Tagen minutengenau ausgewertet. Abbildung 4 zeigt die simulierten Strahlungslasten auf die Westwand am 22. September, aufgeschlüsselt nach Direktstrahlung und Diffusstrahlung. Die meisten Simulationsprogramme zeigen einen sehr ähnlichen Verlauf, mit Ausnahme des Programmes 7 und der Direktstrahlung von 5.

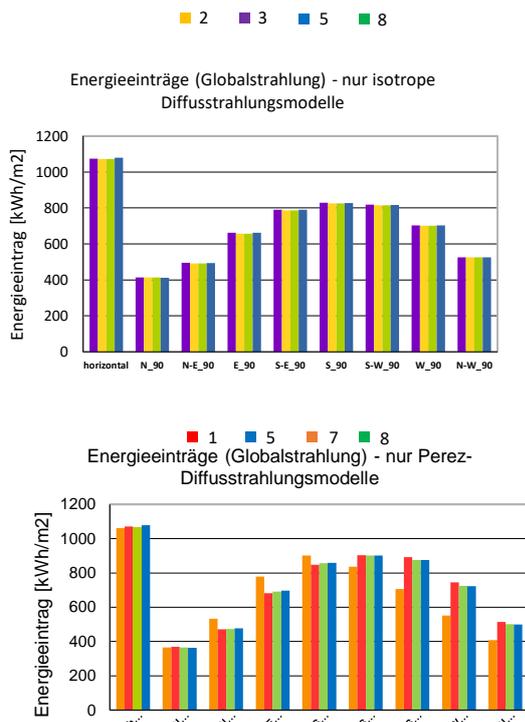


Abbildung 3: Globalstrahlungsjahresbilanzen

Alle Programme haben vergleichbare Sonnenstände (vergl. Testfall 1), daher können Abweichungen in den Ergebnisdaten nur auf folgende Aspekte zurückzuführen sein:

- unterschiedliche Interpretation der Klimadaten,
- unterschiedliche Interpretation der Simulationsergebnisse, und
- fehlerhafte Winkelumrechnung.

Eine fehlerhafte Winkelumrechnung auf die einzelnen Flächen würde zu weitaus größeren Abweichungen führen. Die Unterschiede in den Ergebnissen liegen daher vorwiegend in der Rekonstruktion der Strahlungsdatenverläufe innerhalb einer Stunde aus den integralen stündlichen Mittelwerten. Bei den beteiligten Programmen gibt es bereits 5 verschiedene Arten, wie die Klimadaten interpretiert werden: Stundenmittelwerte, aus denen ein linearer Verlauf innerhalb der Stunde rekonstruiert wird, Momentanwerte am Ende der Stunde bzw. Momentanwerte in der Mitte der Stunde, jeweils mit linearem Verlauf zwischen Stützstellen, konstanter Normalstrahlungswert bzw. Horizontalstrahlungswert während der Stunde. In der Software 5 wird ein komplexerer Ansatz verwendet, der jedoch wie in Abbildung 4 gezeigt, bisweilen zu größeren Ausschlägen bei minutengenaue Berechnung führt. Dies hat zwar bei Stundenintegrationsschritten auf die Jahresbilanzen keine Auswirkung (siehe Abbildung 3), könnte jedoch bei der Modellierung von Regelungsmodellen mit substündlicher Auflösung Konsequenzen haben.

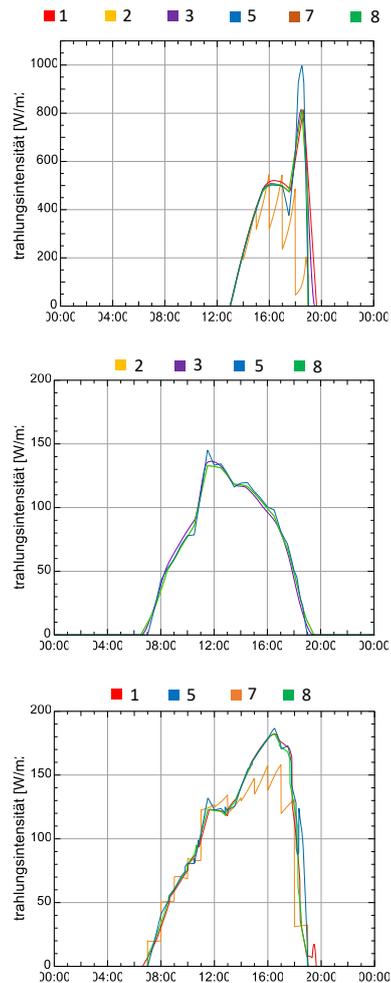


Abbildung 4: Strahlungslasten auf die geneigte Fläche Richtung West - Neigungswinkel 90° - 22. Sept. - Direktstrahlung (oben), Diffusstrahlung isotrop (Mitte), Diffusstrahlung anisotrop (unten)

Für die Validierung der untersuchten Programme wird zunächst von einer zulässigen Abweichung von maximal 10 % zwischen den Simulationsergebnissen und den Referenzwerten ausgegangen. Dabei werden derzeit die Jahresbilanzen verwendet und Referenzergebnisse jeweils für das isotrope und anisotrope Strahlungsmodell individuell festgelegt.

Die Abweichung bei Programm 7 liegt bei fünf Wandausrichtungen überhalb des Grenzwertes. Damit ist dieses Programm zumindest nur teilweise validiert. Alle anderen Programme zeigen Abweichungen in den globalen Jahresenergielasten von < 3%.

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag wurde die Methodik und Zielsetzung des SimQuality-Projekts vorgestellt, wobei Vergleichstest-Validierung für unterschiedliche energetische Gebäude- und Anlagensimulationstools verwendet wird. Es wurden erste Ergebnisse für die Testfälle Sonnenstands- und Solarstrahlungsberechnung beschrieben. Die

Berechnungsergebnisse der einzelnen Simulationsprogramme wurden mit Referenzwerten verglichen (jeweils ein Programm wurde als Referenz festgelegt). Die Vergleiche zeigten zum überwiegenden Teil sehr gute Übereinstimmungen der Ergebnisse, jedoch beim Testfall für solare Lasten durchaus aus größere Abweichungen. Um die Projektergebnisse öffentlich verfügbar zu machen, wird eine SimQuality-Plattform entwickelt. Ziel dieser Plattform ist die übersichtliche Darstellung sämtlicher Simulationsergebnisse der unterschiedlichen Testfälle. Über die reine Darstellung hinaus werden die Simulationsergebnisse eines Testfalls ausgewertet, um eine Aussage über die möglichen Abweichungen zwischen den Ergebnissen treffen zu können. Zudem wird Nutzern die Möglichkeit geboten, an bestehenden Testfällen teilzunehmen, also die Ergebnisse aus eigenen Simulationen hochzuladen oder eigene Testfälle zu erstellen. Die SimQuality-Plattform befindet sich aktuell in der Entwicklung und wird im weiteren Projektverlauf veröffentlicht.

DANKSAGUNG

Das Forschungsprojekt SimQuality (Förderkennzeichen: 03ET1570A-G) wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert. Die Autoren bedanken sich an dieser Stelle für die finanzielle Unterstützung.

LITERATURVERZEICHNIS

- ANSI/ASHRAE Standard 140. (2017). „Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs“.
- Baetens, R., De Coninck, R., Jorissen, F., Picard, D., Helsen, L., Saelens, D. (2015). „OPENIDEAS – An Open Framework for Integrated District Energy Simulations“. BS2015, IBPSA, India.
- BEST Directory. (2020). Building Energy Software Tools.
- Crawley, D.B., Hand, J.W., Kummert, M., Griffith, B.T. (2008). „Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs“. *Build Environ*, 43: 661-673.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A. (1974). „Solar energy thermal processes“.
- EA Systems. (2020). Green City/SimulationX-Planungstool. <http://ea-energie.de/de/products/green-city-simulationsbibliothek-2-2>, 03/2020.
- EQUA Simulation AB. (2020). IDA ICE, <https://www.equa.se>, Zugriff 03/2020.
- FMI. (2019). „Functional Mock-Up Interface Standard“. Version 2.0.1, Modelica Association Project FMI. <https://www.fmi-standard.org>.
- Harish V., Kumar A. (2016). „A review on modeling and simulation of building energy systems“.
- Hensen J., Lamberts R. (2011). „Building performance simulation for design and operation“. Spon Press.
- Hottgenroth Software. (2020). ETU-Simulation, <https://www.hottgenroth.de>, Zugriff 03/2020.
- Judkoff, R., Wortman, D., O’Doherty, B., Burch, J. (2008). „A methodology for validating building energy analysis simulations“. NREL, Golden.
- Kämpf J., Robinson D. (2007). „A simplified thermal model to support analysis of urban resource flows“. *Energy Build*, 39: 445-453.
- Klein S.A., Beckman, W.A., Mitchell, J.W., Duffie, J.A., Duffie, N.A., Freeman, T.L. (2006). „A transient system simulation program“. Solar Energy Laboratory, TRNSYS, University of Wisconsin, (<http://sel.me.wisc.edu/trnsys>).
- Maleki, S.A.M., Hizam, H., Gomes, C. (2017). „Estimation of hourly, daily and monthly global solar radiation on inclined surfaces: models revisited“. *Energies* 10, 134.
- Mattsson, S. E., Elmqvist, H. (1997). „Modelica - An international effort to design the next generation modeling language“. 7th IFAC Symp., Gent.
- Modelica Association. (2020). <http://www.modelica.org>, Zugriff 03/2020.
- Müller, D., Lauster, M., Constantin, A., Fuchs, M., Remmen, P. (2016). „AixLib - An Open-Source Modelica Library Within the IEA-EBC Annex 60 Framework“. In *BauSIM 2016*.
- NANDRAD. (2020). <http://www.bauklimatik-dresden.de/nandrad>, Zugriff 03/2020.
- Nicolai, A., Paepcke, A. (2012). „Die Gebäudesimulationsplattform NANDRAD – physikalisches Modell, Umsetzungskonzept und Technologien im Überblick“. In *BauSIM 2012*.
- Nytsch-Geusen, C., Huber, J., Ljubijankic, M., Rädler, J. (2013). „Modelica BuildingSystems- eine Modellbibliothek zur Simulation komplexer energietechnischer Gebäudesysteme“. *Bauphysik*
- VDI 6020. (2016). „Anforderungen an thermisch-energetische Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation“. VDI Richtlinien, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- Wetter, M., van Treeck, C. (2017). „IEA EBC Annex 60: New Generation Computing Tools for Building and Community Energy Systems“.
- Wetter, M., Zuo, W., Nouidui, T.S., Pang, X. (2014). „Modelica Buildings Library“. *Building Performance Simulation*, 7: 253-270.

SIMULATION UND ABGLEICH MIT MESSUNGEN VON KÜHLUNGSSZENARIOEN MIT CFD UND DEM CLIMATE MODEL WITH STRATIFICATION IN IDA ICE

C. Blatt¹

¹Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Abteilung Werkstoffe und Konstruktion, Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

KURZFASSUNG

In diesem Beitrag werden Kühlungsszenarien in einer Maschinenhalle mit passiver Lüftung und bauteilaktivierten Betonbauteilen mit innenliegenden Kapillarrohrmatten durch Decken- und Wandkühlung untersucht. Die Untersuchungen erfolgen durch zwei neuartige Applikationen in IDA ICE zum einen mit Climate Model with Stratification und zum anderen mit Computational Fluid Dynamics. IDA ICE ist eine Software für die thermische Gebäude-, Anlagen- und Regelungssimulation. Die Simulationen wurden mit einem umfangreichen Monitoring verglichen. Beide Applikationen haben spezifische Vor- und Nachteile, die in diesen vorliegenden Artikel näher dargestellt werden. Die Ergebnisse dieser Arbeit können für weitere Planungen optimal genutzt werden.

ABSTRACT

In this paper cooling scenarios in a machine hall with passive ventilation and component-activated concrete components with internal capillary tube mats are investigated by means of ceiling and wall cooling. The investigations are carried out by two novel applications in IDA ICE one with Climate Model with Stratification and the other with Computational Fluid Dynamics. IDA ICE is a software for thermal building, plant- and control simulation. The simulations were compared with an extensive monitoring. Both applications have specific advantages and disadvantages, which are described in detail in this paper. The results of this paper can be used optimally for further planning.

EINLEITUNG

Im Rahmen eines Verbundforschungsvorhabens wurde auf dem Campus der TU Darmstadt die ETA-Fabrik als Forschungsgebäude erstellt (Abbildung 1). ETA steht für Energieeffizienz, Technologie und Anwendungszentrum. Der innovative Ansatz der ETA-Fabrik liegt in der Vernetzung der einzelnen Teilsysteme Maschine, technische Infrastruktur und Gebäude.

Das Ziel des vorliegenden Beitrags ist es, zwei Modellierungsansätze für vier Kühlungskonzepte zu vergleichen und die Modellergebnisse mit experimentellen Daten der Fabrik zu überprüfen.



Abbildung 1: Maschinenhalle der ETA-Fabrik

Der methodische Ansatz ist es, zunächst in der thermischen Gebäudesimulation vier Kühlungsszenarien mit charakteristischen Tagen bezüglich des Außenklimas und des Innenklimas einer Maschinenhalle zu modellieren und darzustellen. Die Modellergebnisse werden mit experimentellen Daten eines umfangreichen Monitorings aus der ETA-Fabrik verglichen. Stimmen die Tagesverläufe der Raumtemperaturen der Maschinenhalle aus der Gebäudesimulation mit den Messdaten aus dem Monitoring weitgehend überein, ist das Modell der Gebäudesimulation hinsichtlich einer für dieses Untersuchungsziel hinreichend erfüllt und bestätigt. Diese Modelle werden dann mit zwei Applikationen in IDA ICE näher untersucht, zum einen mit dem Climate Model with Stratification, ein detailliertes Zonenmodell mit Schichtung und zum anderen mit Computational Fluid Dynamics (CFD). Die Visualisierungsergebnisse der Applikationen werden dann diskutiert und können unter anderem zu Behaglichkeitsbeurteilungen herangezogen werden.

Kühlungsszenarien

Die Untersuchung der vier Kühlungsszenarien unterteilen sich in einseitige Lüftung, Querlüftung und kombinierte Quer- und thermische Auftriebslüftung, nachfolgend als Auftriebslüftung genannt sowie in Bauteiloberflächenkühlung mit Kapillarrohrmatten.

In (Paul, E. et al., 2014) wird u. a. unterschieden in einseitige Lüftung, Querlüftung sowie in kombinierte Quer- und thermische Auftriebslüftung. Gemäß (DIN EN 16798-7, 2017) ist eine einseitige Lüftung eine Fensterlüftung, bei der sich die Fenster nur auf einer Seite der Lüftungszone befinden. Eine Querlüftung ist eine freie Lüftung infolge des Differenzdrucks, der durch Winddruck auf die Gebäudeaußenflächen entsteht, und bei dem thermischer Auftrieb im Gebäude von geringerer Bedeutung ist. Thermischer Auftrieb ist eine Druckdifferenz, verursacht durch die Differenz der Dichte zwischen Innenraum- und Außenluft auf Grund der Differenz zwischen Innen- und Außentemperatur.

Bei der Bauteiloberflächenkühlung (VDI 6034, 2017) sind Rohrregister oberflächennah in die Betondecke oder Betonwand integriert. Diese Systeme werden entweder vollflächig oder in Randflächen beispielweise in Ergänzung zur Bauteilkühlung für die Zusatzkühlung und gegebenenfalls zonenweise Temperaturreglung eingesetzt.

Applikationen in IDA ICE

Für die Visualisierung werden zwei neuartige Applikationen in IDA ICE eingesetzt zum einen Climate Model with Stratification und zum anderen Computational Fluid Dynamics (CFD). Bei diesen Applikationen handelt es sich um noch nicht fertiggestellte Versionen im Entwicklungsstadium, welche derzeit nur als Betaversion verfügbar sind, was bei der Ergebnisbewertung berücksichtigt werden muss.

Das Climate Model with Stratification (Fornari, W., 2020, Morbitzer, C. 2015) ist ein neues, detailliertes Zonenmodell mit thermischer Schichtung in IDA ICE. Dies wird durch die Diskretisierung der Zone in horizontale Schichten und durch die numerische Lösung von Bilanzgleichungen für mehrere beliebige Anzahlen an Schichten hinweg erreicht. Darüber hinaus werden Wandströmungen und Strömungselemente mitberücksichtigt. Es können mit diesem Modell Variablen wie Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit, mittlere Strahlungstemperatur, operative Temperatur, Beleuchtungsstärke, vorausgesagtes mittleres Votum (PMV) und vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen (PPD) berechnet und die entsprechende Verteilung in der Zone visualisiert werden.

Oftmals ist es notwendig, neben der thermischen Gebäudesimulation und der Anlagensimulation, auch Raumluftrömungen detailliert mittels CFD-Programmen zu analysieren und zu betrachten. Speziell bei Flächenheizsystemen kann es zu deutlichen Zugerscheinungen im Bereich des Lufteintritts kommen, die sich auch im PMV-Index widerspiegeln. Wird der sommerliche Kühlfall betrachtet, müssen hier eine gewisse Dynamik der

solaren Strahlung, Bauschwere des Gebäudes sowie wechselnde innere Lasten mitberücksichtigt werden. (Uponor GmbH, 2013)

Behaglichkeitsbeurteilungen

Zur Auswertung der Simulationen kann zur Beurteilung der Behaglichkeit u. a. nachfolgende Literatur berücksichtigt werden, insbesondere im Hinblick auf Raumtemperaturen und Luftgeschwindigkeiten.

Zur Berechnung und Bewertung des menschlichen Wärmeempfindens werden gemäß DIN EN ISO 7730 (DIN EN ISO 7730, 2006) körperliche Tätigkeiten und Bekleidung, Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte berücksichtigt. Thermische Unbehaglichkeit kann auch durch eine unerwünschte lokale Abkühlung oder Erwärmung des menschlichen Körpers verursacht werden. Die häufigsten Faktoren für das Entstehen von lokaler Unbehaglichkeit sind kalte oder warme Oberflächen, Zugluft (eine lokale durch Luftbewegung verursachte Abkühlung des menschlichen Körpers), vertikale Lufttemperaturunterschiede sowie kalte oder warme Fußböden. Nach Pels-Leusden und Freymark (Pels-Leusden, F. und Freymark H., 1951) sind in jedem Raum geringe Luftströmungen mit einer Untergrenze von etwa 0,08 m/s vorhanden. Eine Luftgeschwindigkeit unter 0,20 m/s ist dem Empfinden nach kaum wahrnehmbar, während eine Bewegung oberhalb 0,20 m/s leicht und oberhalb 0,30 m/s schon deutlich als schwacher Luftzug spürbar wird. Unabhängig von Temperatur und Feuchtigkeit werden bei nicht übermäßiger Arbeit Luftgeschwindigkeiten über 0,30 m/s schon leicht als Zug empfunden und werden als „schlecht“ angesprochen.

KÜHLUNGSSZENARIEN

Im nachfolgenden sind die Kühlungsszenarien mit 3D-Visualisierungen mit Pfeilfarbe und Pfeilgröße der Luftströmungen in IDA ICE dargestellt. Die Kühlung durch einseitige Lüftung (Abbildung 2) erfolgt über die Dachfenster.

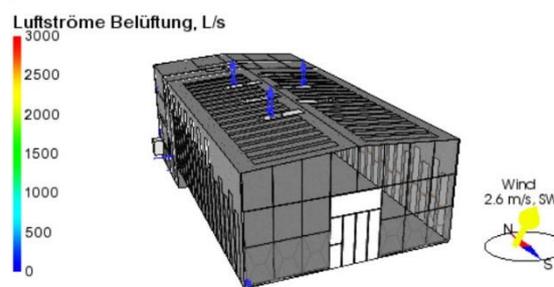


Abbildung 2: Kühlung durch Einseitige Lüftung

Auf der Ostseite kann ein halbes Dachfenster und auf der Westseite können zwei halbe Dachfenster geöffnet werden. Die Luftströmung mit Zu- und Abluft an den Dachfenstern kann durch die blauen Pfeile beobachtet und mit der Legende links bewertet werden. Die kleineren blauen Pfeile, hier im Bild auf der Süd- und Westseite, sind kumulierte Luftströme durch windabhängige Infiltrationen. Die Kühlung durch Querlüftung erfolgt durch drei halbe Fenster auf der Ostseite einströmend und durch drei halbe Fenster auf der Westseite ausströmend, was in Abbildung 3 durch die Pfeile dargestellt wird.

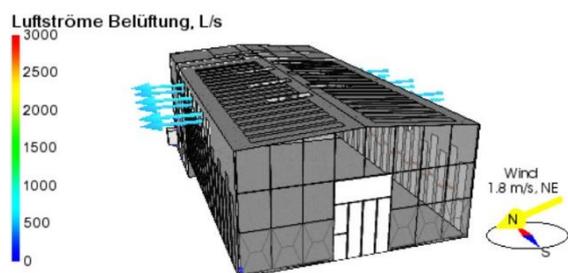


Abbildung 3: Kühlung durch Querlüftung

Die Kühlung durch Auftriebslüftung (Abbildung 4) erfolgt durch das Schiebe-Faltdoor auf der Südseite und der drei halb geöffneten Dachfenster. Die Luftströme der natürlichen Belüftung sind deutlich zu erkennen. Auf der Südseite ist im unteren Bereich des Hallentors eine weitgehend starke einströmende und im oberen Bereich eine geringe ausströmende Luft zu erkennen. Im Bereich der Dachfenster ist eine starke ausströmende Luft zu erkennen.

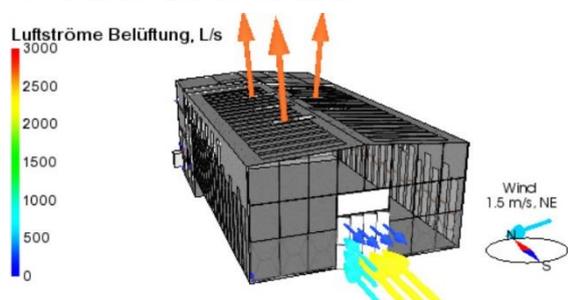


Abbildung 4: Kühlung durch Auftriebslüftung

Werden die drei zuvor benannten Kühlungsprinzipien der natürlichen Lüftung, unter Berücksichtigung der Windabhängigkeit in ihrer Leistung verglichen wird deutlich, dass der Volumenstrom bei der einseitigen Lüftung sehr gering ist, bei der Lüftung durch Querlüftung schon deutlich höher ist und bei der Kühlung durch Auftriebslüftung am wirkungsvollsten ist. In nachfolgender Abbildung 5 ist ein Teil der nach Südost ausgerichteten Maschinenhalle in einer 3D-Visualisierung mit Bauteiloberflächenkühlung im Sommer aus IDA ICE dargestellt. Die Bauteiloberflächenkühlung erfolgt mit innenliegenden Kapillarrohrmatten in den Decken- und Wandelementen. Bei der Herstellung des Tragwerks der Gebäudehülle für die ETA-Fabrik wurden in den Wandelementen 227 m² und den Deckenelementen 224 m² Kapillarrohrmatten im Abstand von ca. 1,5 cm zur Innenseite der Betonbauteile mit einbetoniert.

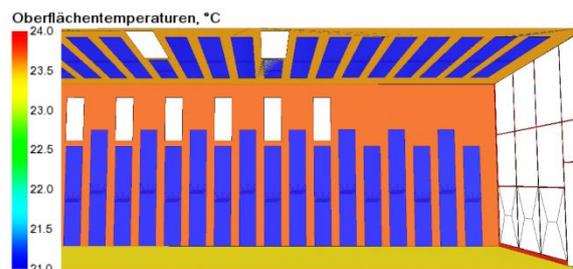


Abbildung 5: Oberflächentemperaturen an den Decken- und Wandelementen

MONITORING

In der ETA-Fabrik wurden ca. 350 Sensoren für ein Monitoring installiert. Zur Evaluierung der innovativen Bauteile der Gebäudehülle mit integrierten Kapillarrohrmatten und der Raumklimaverhältnisse sowie der Speicher wurden Sensoren zur Bestimmung der Temperatur und der relativen Luftfeuchte, Wärmeflussplatten, Strömungssensoren in und an der Gebäudehülle montiert. Des Weiteren wird das Außenklima mit einer Wetterstation erfasst. Das Monitoring begann im Jahre 2016 und ist immer noch aktiv und wird heute unter anderem zur energetischen Optimierung genutzt. Auch Gebäudesimulationsmodelle werden heute noch mit dem Monitoring abgeglichen. Zum Abgleichen der thermischen Gebäudesimulation mit den Messdaten des Monitorings sind insbesondere für die Kühlungsszenarien Temperatursensoren und Strömungssensoren erforderlich (Abbildung 6).

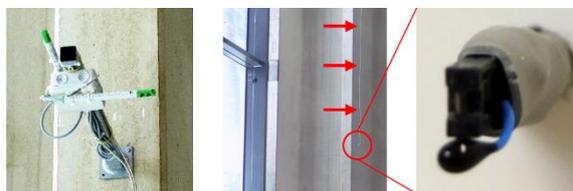


Abbildung 6: Strömungs- und Temperatursensor

In der linken Abbildung sind zwei Strömungssensoren dargestellt, mit denen in zwei Richtungen die Strömungsgeschwindigkeiten gemessen werden können. In der Mitte der Abbildung ist eine von der Decke abgehängte Sensorkombination zur Bestimmung der Temperatur und der relativen Luftfeuchte gezeigt. Rechts ist eine entsprechende Vergrößerung des Kombisensors zu sehen. Die relative Luftfeuchte wurde vereinzelt an verschiedenen Positionen gemessen. Die Raumtemperatur hingegen an sechs verschiedenen Positionen in zwei verschiedenen Höhen. In der nachfolgenden Abbildung 7 ist die Maschinenhalle in einer 3D-Visualisierung mit IDA ICE in Richtung Süden dargestellt. Die roten Würfel zeigen die Sensorpositionen der Strömungssensoren und die weißen die Positionen der Temperatursensoren. Die gelben Flächen stellen die Fensteranteile dar, die zum Lüften geöffnet werden können.



Abbildung 7: Sensorpositionen in der Halle

In nachfolgender Tabelle 1 sind die Temperatursensoren mit Position und Höhen aufgelistet.

Tabelle 1: Übersicht Temperatursensoren

Position	Höhe 1	Höhe 2
NW	4 m	9 m
NO	5 m	9 m
W	4 m	9 m
O	4 m	9 m
SW	4 m	9 m
SO	4 m	9 m

In Tabelle 2 sind die Strömungssensoren mit deren Positionen, Höhe und Messrichtung der Strömungsgeschwindigkeit dargestellt.

Tabelle 2: Übersicht Strömungssensoren

Position	Höhe	Richtung 1	Richtung 2
N	3 m	Ost→West	Oben→Unten
NW	3 m	Süd→Nord	Unten→Oben
NO	10 m	Ost→West	Süd→Nord
SW	3 m	Süd→Nord	Unten→Oben
SO	10 m	Nord→Süd	Ost→West

HALLENTEMPERATUR - VERGLEICH SIMULATION MIT DEN MESSDATEN

Um herauszufinden welche typischen Temperaturverläufe für die einzelnen Kühlungsszenarien von Bedeutung sind wurden unterschiedliche Versuche und die jeweiligen Temperaturkurven und Strömungsgeschwindigkeiten im Zeitraum von 2016 bis heute ausgewertet. Tage bei denen sich das Kühlungsverhalten in den Temperaturkurven charakteristisch einheitlich und ausgeprägt darstellte wurden ausgewählt. Nachfolgend werden zwei charakteristische Tage, der 09.08.2018 (Abbildung 8) und der 23.08.2019 (Abbildung 9), bei denen die thermische Gebäudesimulation mit Messdaten des Monitorings der ETA-Fabrik verglichen wurde, dargestellt. Zu sehen sind jeweils eine Kurvenschar der 12 Temperatursensoren aus der Maschinenhalle sowie in grau die Außentemperatur. In türkis ist der jeweilige Kurvenverlauf aus der thermischen Gebäudesimulation dargestellt, der weitgehend den Verlauf der Kurvenschar der Temperaturmessungen entspricht. In Abbildung 8 ist die Auswirkung auf den Temperaturverlauf in der Maschinenhalle durch die

einseitige Lüftung mit den Dachfenstern im Zeitraum von 6:00 Uhr bis 7:00 Uhr und die Auftriebslüftung mit den Dachfenstern und dem Tor auf der Südseite im Zeitraum von 7:00 Uhr bis 9:30 Uhr zu sehen. Zwischen der Legende und den Kurven sind die Zeiträume durch horizontale Linien und vertikal der jeweilige Zeitpunkt für die spätere CFD Berechnung dargestellt. Festzustellen ist, dass die einseitige Lüftungskühlung über das Dach nur einen wesentlich geringeren Kühlungseffekt hat als die Auftriebslüftung mit den Dachfenstern und dem Tor auf der Südseite der Maschinenhalle.

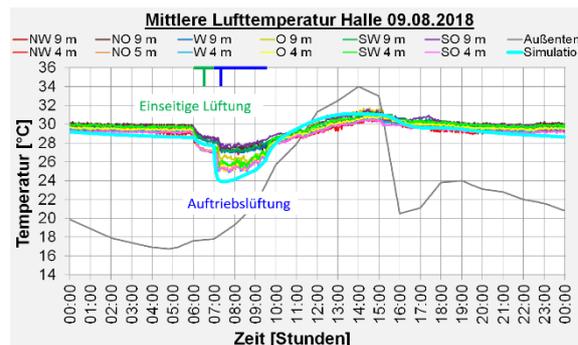


Abbildung 8: Kühlung durch Einseitige- sowie Auftriebslüftung

In Abbildung 9 sind die Auswirkungen der Kühlung durch Querlüftung auf den Temperaturverlauf in der Maschinenhalle mit den seitlichen Wandfenstern der West- und Ostseite von 0:00 Uhr bis 10:00 Uhr und die Bauteiloberflächenkühlung mit den Kapillarrohrmatten in den Decken- und Wandelementen von 5:00 Uhr bis 13:00 Uhr zu sehen.

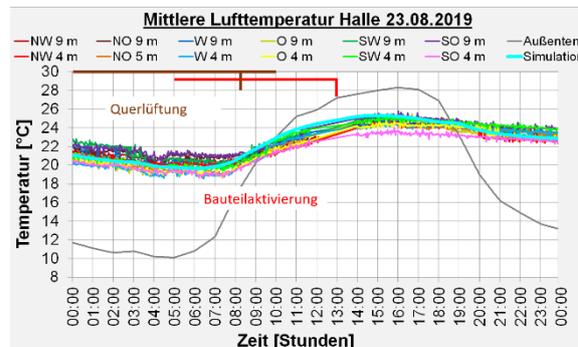


Abbildung 9: Kühlung durch Querlüftung und durch Bauteilaktivierung

Die Bauteiloberflächenkühlung erfolgte meist nur bis zur Mittagszeit, um dann die Büros zu kühlen. Zuerst erfolgte die Kühlung mit dem über Nacht gekühlten 50 m³ Speichermedium aus drei Betonwasser speichern und dann mit einer Wärmepumpe in umgekehrter Arbeitsrichtung. Beim Vergleich der beiden Kurvenverläufe der Querlüftung und der Auftriebslüftung ist festzustellen, dass der Kühlungseffekt der Auftriebslüftung deutlich größer ist als bei der Querlüftung. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass bei Auftriebslüftung das Hallentor

geöffnet sein muss und dies nachts sicherheitstechnisch nur bedingt erfolgen kann.

ERGEBNISSE MIT CLIMATE MODEL WITH STRATIFICATION IN IDA ICE

Nachfolgend werden die Ergebnisse mit drei unterschiedlichen Varianten mit Climate Model with Stratification gezeigt, also die Visualisierung mit Temperaturschichtung, Strömungselemente durch Öffnungen und Oberflächentemperaturen. Die Grundeinstellungen erfolgten für die Maschinenhalle mit einer Höhe der zu berechneten und dargestellten Schichten von 0,75 m und einer Auflösung der Gitterpunkte in horizontale und vertikale Richtung von 0,75 m sowie einem Zeitschritt von 0,25 Stunden. In Abbildung 10 sind vier Aufnahmen mit aufeinanderfolgenden Zeitschritten der Halle dargestellt.

Einseitige Lüftung und Auftriebslüftung

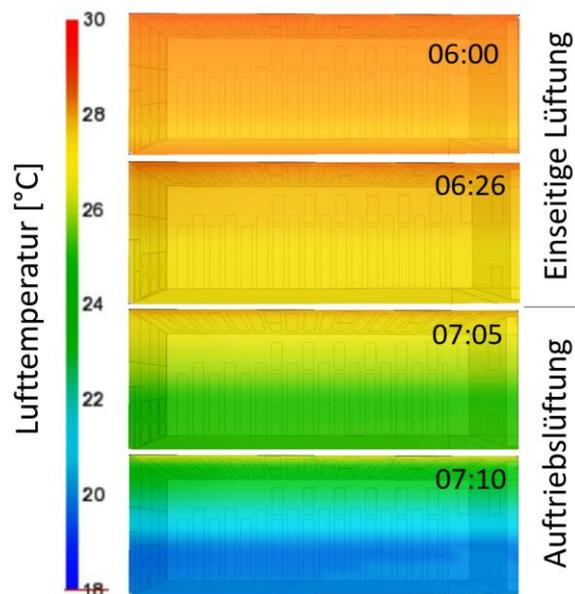


Abbildung 10: Visualisierung mit Climate Model with Stratification Kühlung durch Einseitige- und Auftriebslüftung

Die Blickrichtung auf den einzelnen Bildern ist von der Raummitte nach Westen gerichtet, links ist das Hallentor und rechts die Wand zum Bürotrakt. Die einseitige Lüftung mit den Dachfenstern verläuft im Zeitfenster von 6:00 Uhr bis 7:00 Uhr, also in den ersten zwei oberen Bildern. Danach erfolgt zwischen 7:00 Uhr und 9:30 Uhr eine Auftriebslüftung mit den Dachfenstern und dem Hallentor. Die Abkühlung ist in den zwei darunterliegenden Bildern bis 07:10 Uhr dargestellt. Bei der einseitigen Lüftung, mit den Dachfenstern sind nur geringe Schichtungen und nur geringe Temperatursenkungen festzustellen. Deutlichere Temperaturschichtungen und

Temperatursenkungen sind hingegen bei der Auftriebslüftung, bei der die kalte Außenluft um 7:00 Uhr durch das Hallentor einströmt und die erwärmte Luft durch das Dachfenster wieder an die Außenluft abgegeben wird festzustellen.

Querlüftung

In Abbildung 11 ist die Querlüftung über die jeweils drei seitlichen Wandfenster der Ost- und Westseite mit den Strömungsgeschwindigkeiten dargestellt.

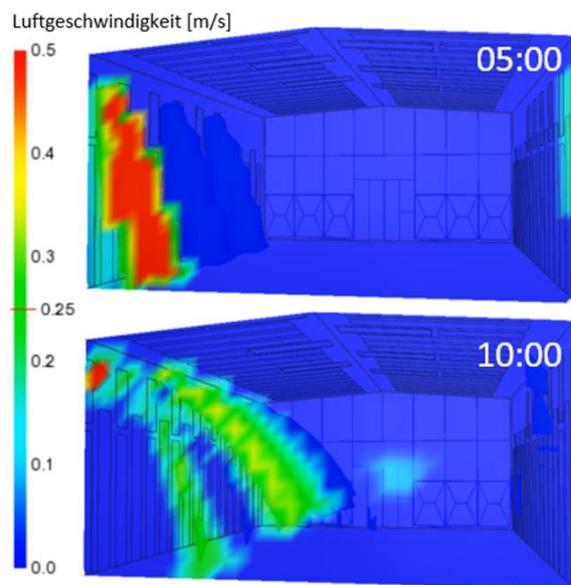


Abbildung 11: Visualisierung mit Climate Model with Stratification Kühlung durch Querlüftung

Von links, von Osten, strömt die Kaltluft in die Halle hinein. Der vordere Teil des Bildes zeigt einen Schnitt durch den Strömungsbereich, links dahinter sind die einfallenden Luftströmungen mit einer Luftgeschwindigkeit von 0,25 m/s als dreidimensionale blaue vom Fenster abfallende Wolken dargestellt. Im zweiten Bild erhöht sich die Raumtemperatur und die Luftströmung fällt nicht mehr so stark vertikal herunter, sie erfährt einen Auftrieb in horizontale Richtung.

Bauteiloberflächenkühlung

Die Bauteiloberflächenkühlung an einem sonnigen Tag um 12:00 Uhr ist in Abbildung 12 dargestellt. Dabei ist die Innenseite der Westwand mit einem oberflächennahen Temperaturprofil zu sehen. Die kühleren Bereiche der Bauteiloberflächenkühlung mit den Kapillarrohrmatten sind in blau dargestellt. Im Bild links, in der Mitte und im oberen Bereich sind wärmere Bereiche durch die einfallende Solarstrahlung über die Glasfassade der Südseite und der einfallende Solarstrahlung über die Dachfenster gelb eingefärbt.

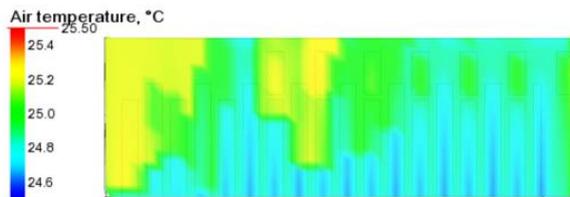


Abbildung 12: Visualisierung mit Climate Model with Stratification Bauteilaktivierte Westseite

ERGEBNISSE MIT CFD IN IDA ICE

Mit der Strömungssimulation kann die Lufttemperatur, die Luftgeschwindigkeit und Strömungsrichtung visualisiert werden. Die Luftströmungen der offenen Türen und Fenster werden zunächst mit der thermischen Gebäudesimulation im Zonenmodell berechnet und dann als Randbedingung für die Strömungssimulation überführt. Im nachfolgenden wird die Visualisierung der vier Kühlungsszenarien beschrieben.

Einseitige Lüftung

Die Visualisierung der einseitigen Lüftung über die Dachfenster wird in Abbildung 13 gezeigt. Im Querschnitt ist die Schichtung der Lufttemperaturen zu sehen, welche von oben nach unten hin abfallen. An den beiden geöffneten Dachfenstern auf der Westseite ist die abfallende Luftströmung nach unten hin deutlich zu erkennen.

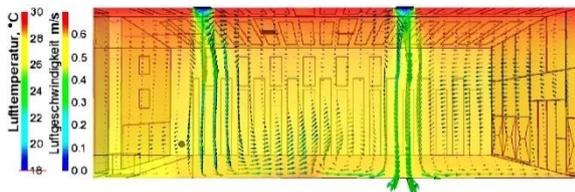


Abbildung 13: Visualisierung der Lufttemperatur und Luftgeschwindigkeit mit CFD Einseitige Lüftung

Querlüftung

Die Querlüftung wird in Abbildung 14 explizit mit der Luftgeschwindigkeit dargestellt.

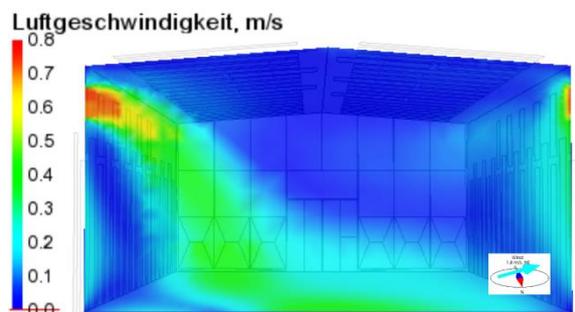


Abbildung 14: Visualisierung der Luftgeschwindigkeit mit CFD Querlüftung

Die einströmende und in der Zone vom oberen Fenster abfallende Luft nach unten zum Boden hin ist auf der linken Seite im Bild zu erkennen. Auf der rechten Seite erhöht sich die Luftgeschwindigkeit wieder nach oben hin zum Fenster, bei dem die Luft dann nach außen austritt.

Auftriebslüftung

Bei der Auftriebslüftung sind in Abbildung 15 die Lufttemperatur und die Luftgeschwindigkeit dargestellt. Hier wird deutlich, dass die Luft bodennah vom Hallentor, im Bild auf der rechten Seite, in die Maschinenhalle bis zur gegenüberliegenden Wand einströmt. In der Mitte der Zone findet ein Luftauftrieb statt. An den beiden oberen Dachfenstern ist die ausströmende Luft zu erkennen. Anhand der Pfeile insbesondere im Bereich der Dachfenster kann die Strömungs-geschwindigkeit und die Richtung abgelesen werden.

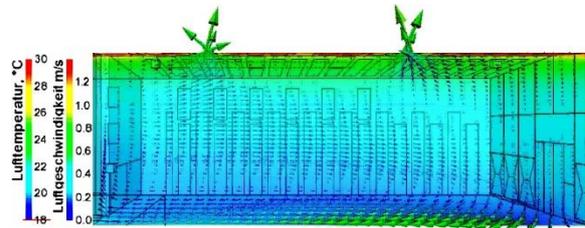


Abbildung 15: Visualisierung der Lufttemperatur und Luftgeschwindigkeit mit CFD bei Auftriebslüftung

Bauteilaktivierung

Bei der Bauteiloberflächenkühlung ist in Abbildung 16 nur eine geringe Temperaturschichtung zu sehen. Die Luftströmung verläuft von der oberen Mitte der Halle (First) jeweils zur Ost- und Westwand, danach abfallend nach unten, wo im unteren Bereich ein Auftrieb entsteht, der durch die einströmende Solarstrahlung in der Mittagszeit, hier um 13:00 Uhr, partiell den Hallenboden erwärmt und dadurch einen Luftauftrieb bewirkt.

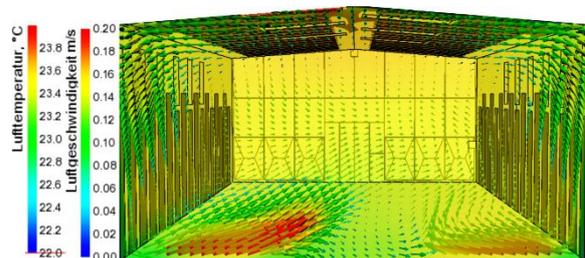


Abbildung 16: Visualisierung der Lufttemperatur und Luftgeschwindigkeit mit CFD Bauteilaktivierung

SIMULATION UND MESSDATEN

Nachfolgend werden die Strömungssimulationen mit Messdaten des Monitorings der ETA-Fabrik an zwei Kühlungsszenarien verglichen, zum einen bei der Auftriebslüftung und zum anderen bei der Querlüftung. Für beide Szenarien wurden die

Strömungssensoren im Norden der Maschinenhalle verwendet. Einer der Strömungssensoren misst die Strömungsgeschwindigkeit von Ost nach West und der andere von oben nach unten. Mit dieser Anordnung der Strömungssensoren ist es möglich in zwei Richtungen zu messen und damit können auch Umrechnungen erfolgen je nach Winkel der Strömung. Zu berücksichtigen ist bei der Strömungssimulation, dass in der Maschinenhalle bei den Messungen noch Maschinen und Gegenstände aufgestellt sind und in der Gebäudesimulation und der Visualisierung in CFD die Halle als leer angesehen wird. Der Vergleich kann daher nur eine Tendenz wiedergeben.

Querlüftung

Der Vergleich der Querlüftung der CFD mit den Messdaten des Monitorings bezieht sich auf den 23.08.2019 um 8:15 Uhr. In nachfolgender Abbildung 17 ist die Maschinenhalle in Richtung Süden gezeigt. Von der Ostseite (links im Bild) strömt Kaltluft durch das Fenster in die Halle hinein, dies wird durch die dreidimensionale blaue Wolke mit einer Lufttemperatur von 20 °C gezeigt. Der Messpunkt der Strömungssensoren im Norden wird durch den roten quadratischen Rahmen dargestellt. Der Strömungsauftrieb im Bereich des Messpunktes kann etwa diagonal von Ost-unten nach West-oben mit einer Strömungsgeschwindigkeit von etwa 0,15–0,25 m/s angegeben werden.

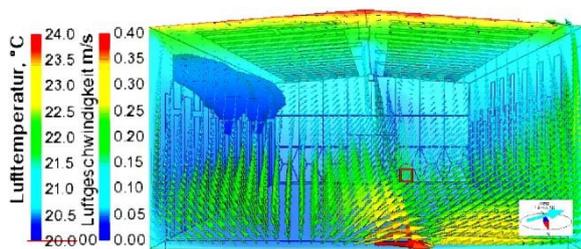


Abbildung 17: Vergleich der CFD mit Messergebnissen der Querlüftung

Die Messdaten der Strömungssensoren (Abbildung 18) zeigen zu diesen Zeitpunkt Luftgeschwindigkeiten von Ost nach West bis etwa 0,15 m/s und von oben nach unten um die 0,20 m/s.

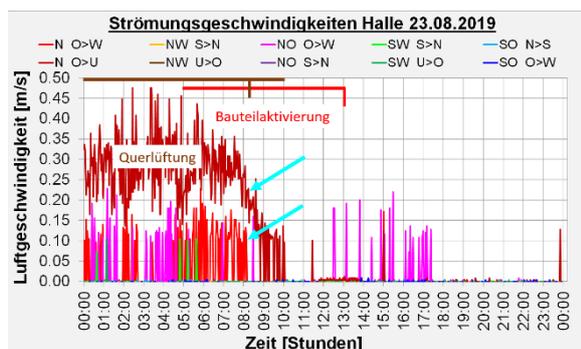


Abbildung 18: Strömungsgeschwindigkeiten bei Querlüftung und Bauteilaktivierung

Auftriebslüftung

Der Vergleich der Auftriebslüftung der CFD mit den Messdaten des Monitorings bezieht sich auf den 09.08.2018 um 7:15 Uhr. Hierbei strömt kalte Luft aus dem Hallentor der Südseite in die Halle hinein. In Abbildung 19 ist auch hier die einströmende Luft mit einer bodennahen blauen Wolke mit einer Temperatur von 19 °C dargestellt. An der Messstelle liegen die Strömungsgeschwindigkeiten bei etwa 0,15–0,20 m/s. Der Strömungsverlauf ist überwiegend von unten nach oben mit einer Tendenz von Ost nach West.

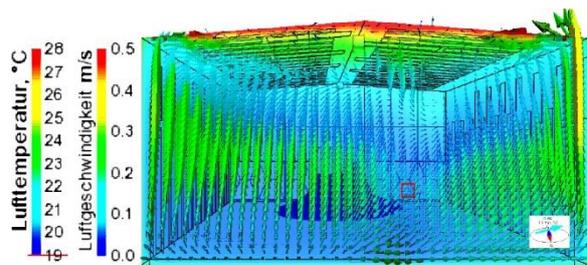


Abbildung 19: Vergleich der CFD mit Messergebnissen der Auftriebslüftung

Die Messdaten der Strömungssensoren in Abbildung 20 zeigen zu dem Zeitpunkt Luftgeschwindigkeiten von Ost nach West mit bis zu etwa 0,30 m/s und keine Geschwindigkeiten von oben nach unten.

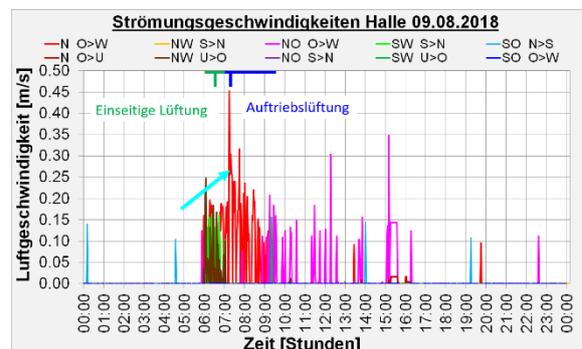


Abbildung 20: Strömungsgeschwindigkeit bei Einseitige- und Auftriebslüftung

DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Beim Vergleich der CFD Simulation mit den Messdaten der Querlüftung ist festzustellen, dass die Luftgeschwindigkeiten von Ost nach West in etwa gleich sind, hingegen bei der CFD Simulation keine Strömung von oben nach unten erfolgt. Werden die Ergebnisse bei der Auftriebslüftung verglichen ist festzustellen, dass an den Messpunkt sowohl bei der CFD Simulation und beim Monitoring keine Strömung von oben nach unten erfolgt. Die Strömungsgeschwindigkeiten liegen beim Monitoring von Ost nach West bis zu 0,30 m/s und in der CFD Simulation etwa bei 0,15 m/s bis 0,20 m/s. Zusammenfassend zeigen sich bei der einseitigen Lüftung, der Querlüftung und der Auftriebslüftung, dass sich im unteren Bereich der Halle, wo sich Mitarbeiter und Maschinen befinden, an exponierten

Stellen Strömungsgeschwindigkeiten über 0,30 m/s einstellen und diese explizit bei Behaglichkeitsbetrachtungen berücksichtigt werden sollte.

Nachfolgend werden die Vorteile und Nachteile der beiden neuartigen Applikationen Climate Model with Stratification und CFD in IDA ICE diskutiert. Vorteile zeigen sich bei der Applikation des Climate Model with Stratification gegenüber CFD darin, dass die Berechnung und Visualisierung dynamisch in kleinen Zeitschritten und über einen längeren Zeitraum erfolgen kann, die Simulationszeiten wesentlich kürzer sind und sich viele Möglichkeiten der Visualisierung bieten. In diesem Beitrag wurden die Raumtemperatur, die Oberflächentemperatur und die Luftgeschwindigkeit mit Strömungselementen dargestellt. Weitere Optionen bieten die Visualisierungen der Strahlungstemperatur, der operativen Temperatur, PMV und PPD. Limitiert wirkt bei der Applikation, dass bei der Temperaturverteilung ein Mittelwert je Schicht gebildet wird. Vorteile der Applikation CFD gegenüber dem Climate Model with Stratification liegen in der Temperaturverteilung und den Strömungsgeschwindigkeiten, die genauer durch die Bildung eines engmaschigen Netzes berechnet werden können. Die Strömung wird durch dreidimensionale Vektoren dargestellt und die Strömungsgeschwindigkeit durch Fehlfarben und Größe der Vektoren angezeigt. Limitierend wirkt sich bei der Applikation aus, dass die Berechnung und Visualisierung in IDA ICE statisch ist und längere Rechenzeiten benötigt.

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag wurden vier Kühlungskonzepte für die Maschinenhalle der ETA-Fabrik mittels thermischer Gebäudesimulation und einem umfangreichen Monitoring verglichen. Mit diesen Ergebnissen wurden die Kühlungskonzepte in IDA ICE mit zwei neuartigen Applikationen zum einen Climate Model with Stratification und zum anderen mit Computational Fluid Dynamics visualisiert und ebenfalls verglichen. Aus diesen Untersuchungen lässt sich schließen, dass sich beide Applikationen gut ergänzen. Mit Climate Model with Stratification können zunächst schnelle Ergebnisse berechnet und über einen längeren Simulationszeitraum betrachtet werden. Dabei können Extrema lokalisiert und dann detaillierter in CFD untersucht werden. Mit diesem zuvor beschriebenen Vorgehen können insbesondere für Kühlungszenarien in Hallen Bauteilöffnungen positioniert und dimensioniert sowie Regelungsstrategien entwickelt werden. Des Weiteren können durch die Visualisierung bauphysikalische Fragestellungen viel besser verstanden werden. Auch Auswirkungen der passiven und aktiven Kühlung

können hinsichtlich Behaglichkeit und Kühlleistung überprüft und optimiert werden.

AUSBLICK

Mit den Applikationen Climate Model with Stratification und Computational Fluid Dynamics in IDA ICE werden nun weitere Optimierungen und Regelungsstrategien zur Hallenkühlung erfolgen.

DANKSAGUNG

Ein Teil der in diesem Beitrag dargestellten Forschungsergebnisse wurden im Projekt Energieeffiziente Fabrik für interdisziplinäre Technologie- und Anwendungsforschung (ETA-Fabrik) erarbeitet, Förderkennzeichen 03ET1145A gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

LITERATUR

- DIN EN 16798-7, 2017. Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 7: Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Luftvolumenströme in Gebäuden einschließlich Infiltration. Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN ISO 7730, 2006. Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit. Deutsches Institut für Normung e.V.
- Fornari, W., 2020. The Climate Model with stratification. EQUA Simulation AB, Solna, Schweden.
- Morbitzer, C., 2015. Simulationsbasierte Bewertung sommerlicher Bedingungen in Gebäuden. In: Bauphysik Kalender 2015: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, S. 377–414.
- Paul, E. et al., 2014. Lüftung in Wohngebäuden. Planung und Umsetzung nach DIN 1946-6. Merching: Forum Verl. Herkert (PlanungsPraxis).
- Pels-Leusden, F. und Freymark H., 1951. Darstellung der Raumbehaglichkeit für den einfachen praktischen Gebrauch. Gesundheitsingenieur 72 (1951) Nr. 16, S. 271-273.
- Uponor GmbH, 2013. Praxishandbuch der technischen Gebäudeausrüstung (TGA). 1. Aufl. Berlin: Beuth (Praxis Technische Gebäudeausrüstung).
- VDI 6034, 2017. Raumkühlflächen. Planung, Bau und Betrieb. Verein deutscher Ingenieure.

WÄRMETRANSPORT VIA INNENTÜREN & FENSTERLÜFTUNG AM BEISPIEL EINES EINFAMILIENHAUSES MIT EINZELRAUMFEUERUNG IN TRNSYS

O. Mercker¹, D. Büchner² und P. Pärisch¹

¹Institut für Solarenergieforschung GmbH, Hameln/Emmerthal, Deutschland

www.isfh.de, E-Mail: o.mercker@isfh.de

²Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH, Leipzig, Deutschland

www.dbfz.de, E-Mail: daniel.buechner@dbfz.de

KURZFASSUNG

Der Beitrag betrachtet konvektiven Wärmetransport durch offene Fenster und Innentüren am Beispiel eines Einfamilienhauses in Bungalow-Bauweise mit Einzelraumfeuerungsstätte in TRNSYS. Ausgehend von der Beschreibung des Gebäude- und Anlagenmodells wird ein Ansatz zur Abbildung des konvektiven Wärmetransports durch geöffnete Fenster- und Innentüren vorgestellt. In einer Simulationsstudie werden abschließend der Einfluss unterschiedlicher Parameter auf das thermische Verhalten des Gebäudes analysiert und Empfehlungen für die Simulationspraxis abgeleitet.

ABSTRACT

The paper focuses on convective heat transfer via opened windows and internal doors in a single family house of bungalow style in TRNSYS. Based on the description of the underlying building and heat supply system models, an approach for modeling convective heat transfer through opened windows and internal doors is presented. Finally, within a simulation study the influence of several parameters on the thermal performance of the building is analysed and recommendations for simulation praxis are derived.

EINLEITUNG

Mit zunehmendem Anteil volatiler Solar- und Windenergie an der Stromerzeugung wachsen auch die Anforderungen an das Stromnetzmanagement zur Aufrechterhaltung der Netzfrequenz durch permanente Äquivalenz von Stromproduktion und -verbrauch. Derzeit wird diese meist durch den stromgeführten Betrieb konventioneller Kraftwerke und KWK-Anlagen, den Einsatz von „etablierten“ Stromspeichertechnologien, sowie das Zu-/Abschalten von Lasten in Gewerbe und Industrie (Demand-Side-Management) sichergestellt. In Zukunft könnte die Erzeugung von chemischen Energieträgern in Zeiten regenerativen Stromangebots als Methode zur Stromnetzstabilisierung hinzukommen. Der Fokus der Stromnetzstabilisierung liegt heute auf kosten- und investitionsintensiven Speicherverfahren (sowie dem Stromnetzausbau). Das Potenzial der sektorenübergreifenden Flexibilitätsoption (bereits vorhandener) Biomassefeuerungen wird bisher kaum beachtet.

Nach (Lenz *et al.*, 2017) sind in Deutschland derzeit 10 bis 11 Mio. Einzelraumfeuerstätten (ERF) zu finden. Als ERF gelten entsprechend der 1. BImSchV Kamin- und Dauerbrandöfen, Pelletöfen sowie Heiz- und Kamineinsätze, die dazu dienen „vorrangig“ den Aufstellraum zu beheizen. Mit einer für Neugeräte gängigen Heizleistung von 8 kW_{th} pro ERF ergäbe dies 80 bis 90 GW_{th}, die zum (Zu-)Heizen oder aus Komfortgründen genutzt werden. Da alte ERF noch größere Leistungen aufweisen, stellt der Schätzwert die untere Grenze des Potenzials dar.

Vor diesem Hintergrund sollen im Projekt „Optionen zum netzdienlichen Betrieb von Einzelraumfeuerstätten“ (kurz: „OptDienE“) das derzeitige sowie das zukünftige Potenzial zur Vermeidung von Strom- und/oder Gasnachfragespitzen durch netzdienlichen ERF-Betrieb sowohl auf Gebäude- als auch Systemebene quantifiziert werden. Um dieses Potenzial zu bestimmen, werden Systemsimulationen in TRNSYS durchgeführt.

Nachdem in (Mercker *et al.*, 2020) bereits Erläuterungen zum zu Grunde liegenden Gebäude- und Anlagenmodell mit ersten Simulationsergebnissen vorgestellt wurden, erfolgt in diesem Beitrag eine detailliertere Betrachtung des konvektiven Wärmetransports durch offene Fenster und Innentüren. Diese Wärmetransportmechanismen sind (im vorliegenden Projekt) relevant, um die Ausbreitung der von einer ERF gelieferten Wärmemenge im Gebäude modellieren und somit auch ihre Nutzbarkeit bewerten zu können.

GEBÄUDEMODELL

Nun folgend werden wesentliche Informationen zum untersuchten Gebäudemodell präsentiert. Eine umfassende Beschreibung enthält (Mercker *et al.*, 2020).

Untersucht wird ein Einfamilienhaus (EFH) in Bungalow-Bauweise. Der Gebäudetyp wird als repräsentativ für barrierearmes bzw. altersgerechtes Wohnen angesehen und stellt zudem bezüglich der Wärmeübertragung einen charakteristischen Fall dar: freie konvektive Wärmeübertragung „ausschließlich“ innerhalb einer Etage. Die Modellierung erfolgt in SketchUp/TRNSYS3d und die Einbindung in die Simulation mit dem Multi Zone Building (Type 56). Abbildung 1 zeigt das 3D-Gebäude in SketchUp.

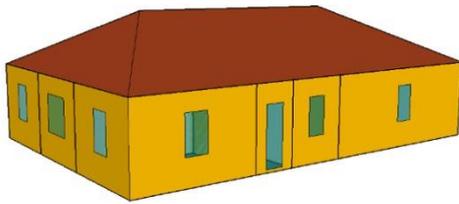


Abbildung 1: 3D-Ansicht des EFH-Bungalows

Der „geometrischen“ Grundfläche von 129 m² korrespondieren 113 m² Nutzfläche nach EnEV. Die Fläche der Außenwände (abzüglich der Fenster) beträgt 109 m². Die Gesamtfensterfläche beträgt 18 m² und je 1/8 der Grundfläche der einzelnen Räume, wobei je 1,28 m Fensterhöhe bei einer entsprechend variablen Fensterbreite und einer festen Brüstungshöhe von 0,9 m unterstellt werden. Der *g*-Wert aller Fenster beträgt 0,591. In Tabelle 1 sind neben diesen Flächenangaben noch die *U*-Werte der soeben genannten Teile der Gebäudehülle sowie die Produkte beider Größen aufgeführt.

Tabelle 1: Eigenschaften der Gebäudehülle

BEREICH	A	U	(UA)
	m ²	W/(m ² K)	W/K
Bodenplatte	129,04	0,35	44,6
Außenwände	108,92	0,29	31,4
Geschossdecke	129,04	0,41	52,3
Dach	143,77	0,21	29,8
Fenster	17,87	1,27	22,7

Das EFH weist sieben beheizte Räume mit jeweils individuell vorgebbaren Raumsolltemperaturen auf: Schlaf-, Wohn-, Kinder- und Gästezimmer sowie Technikraum, Bad und WC. Hinzu kommen die unbeheizten Bereiche: Flur und Dachboden. Die ERF befindet sich im Wohnzimmer gemäß Abbildung 2.

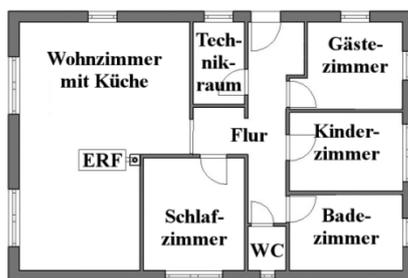


Abbildung 2: Grundriss des EFH-Bungalows

Die Anbindung des Gebäudes an das Erdreich erfolgt über eine Temperaturrandbedingung. Dieser Temperaturverlauf wird aufgrund der hohen Rechenzeit einmal mit dem Type 1244 (Soil Model for Type 56 Floors) vorsimuliert und in weiteren Simulationen als fester Datensatz eingelesen. Details hierzu sind in dem Beitrag (Mercker et al., 2020) dokumentiert.

Es wird angenommen, dass das Gebäude eine ganzjährig konstante Belegung durch zwei Personen aufweist, woraus sich ein flächenspezifischer interner Gewinn durch Körper- und Geräteabwärme von 2,1 W/m² sowie ein weiter unten im Beitrag noch genannter TWW-Bedarf ergibt (Loga et al., 2015).

ANLAGENMODELL

Die Versorgung des EFH mit Raumheizwärme (RH) und Trinkwarmwasser (TWW) erfolgt mit Hilfe der in Abbildung 3 dargestellten Anlagentechnik. Im Zentrum steht ein 600 l Pufferspeicher (Type 340), der von einem 8 kW Gaskessel (Type 203 – Eigenentwicklung des ISFH) beladen wird. Der Pufferspeicher weist dabei ein Bereitschaftsvolumen für die TWW-Bereitung von 250 l im oberen Segment auf, unter dem sich ein 250 l Bereitschaftsvolumen für die RH befindet. Darunter werden nochmals 100 l als Zusatzvolumen angefügt, das zur Einbindung des kalten Rücklaufs von der TWW-Bereitung dient.

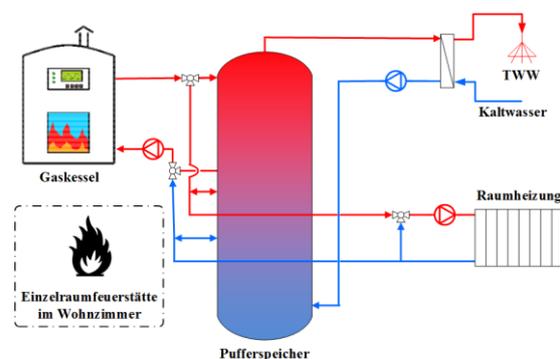


Abbildung 3: Prinzipschaltbild der Anlagentechnik

Die TWW-Bereitung erfolgt im Durchflussprinzip über eine Frischwasserstation (Type 808) mit einer Wärmeträgerleistung $UA_{hx,ref}$ von 3000 W/K bei einer Zapfmenge $m_{hx,ref}$ von 1000 kg/h. Aufgrund des geringen Volumens an „stehendem“ TWW (unter 3 l) zu den Zapfstellen kann auf eine Zirkulation verzichtet werden. Die Raumheizwärme wird über Radiatorheizkörper (Type 362) an die einzelnen Räume abgegeben, wobei die Versorgung mit Raumheizwärme entweder aus dem Pufferspeicher oder direkt über den Gaskessel erfolgt, der hierfür über T-Stücke an den Pufferspeicher angeschlossen ist. Die ERF wird mit einem am Deutschen Biomasseforschungszentrum (DBFZ) entwickelten TRNSYS-Type simuliert (derzeit noch nicht veröffentlicht). Abbildung 4 zeigt den zeitlichen Verlauf der Heizleistung Q_{ERF} und der Heizenergiemenge, die an die Luft im Wohnzimmer abgegeben wird. Als Parameter werden lediglich die pro Abbrandvorgang (mit einer festen Dauer von 45 min) eingegebene Brennstoffenergiemenge (hier: 2 kWh) und der Abgasverlust (hier: 7 %) benötigt. Innerhalb der Heizperiode wird somit stets von 16:30 bis 19:30 Uhr eine Wärmemenge von rund 7,5 kWh eingebracht, was insgesamt 1587 kWh pro Jahr entspricht.

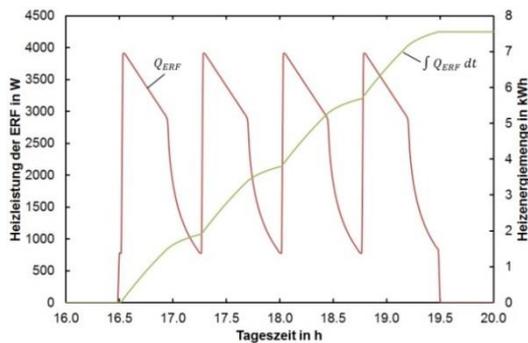


Abbildung 4: Heizleistung und Heizenergiemenge des ERF-Modells im Tagesverlauf

Dimensionierung und Parametrierung aller Komponenten folgen dem Primat der Versorgungssicherheit (Erreichen der Raumsolltemperaturen und TWW-Nutztemperaturanforderung) und stellen kein primär-energetisches oder ökonomisches Optimum dar.

RANDBEDINGUNGEN

Wetter

Als meteorologische Randbedingung werden die Wetterdaten aus dem Testreferenzjahr 2004 für den Standort Zürich (Breitengrad: 47,38°; Längengrad - 8,57°; Höhe: 556 m) verwendet. In Anlehnung an (Heimrath & Haller, 2007) sind in **Tabelle 2** einige wichtige Kenngrößen dieses Datensatzes aufgelistet.

Tabelle 2: Wesentliche Kenngrößen des Wetterdatensatzes TRY Zürich 2004

MERKMAL	WERT	EINHEIT
Mittlere Außentemperatur	9,07	°C
Minimale Außentemperatur	-9,70	°C
Maximale Außentemperatur	29,20	°C
Strahlungssumme horizontal	1086,5	kWh/m ²
Anteil Diffusstrahlung	58 %	-

TWW-Zapfprofil

Ein minutlich aufgelöstes TWW-Zapfprofil wird mit DHWcalc 2.02b erzeugt (Jordan & Vajen, 2003). Als durchschnittliche Tageszapfmenge werden 95,3 l angesetzt. Die TWW-Nutztemperatur wird auf einen konstanten Wert von 45 °C festgelegt. Mehr Informationen zum Zapfprofil sind in (Mercker et al., 2020) dokumentiert. Der TWW-Nutzwärmebedarf beträgt in Übereinstimmung mit (DIN V 18599-10, 2007) rund 12,5 kWh/(m² a).

Raumsolltemperaturen

Das Gebäudemodell erlaubt es raumweise unterschiedliche Raumsolltemperaturen vorzugeben, da jeder Raum eine separate thermische Zone darstellt. Dabei werden ganzjährig konstante Raumsolltemperaturen vorgesehen, die in den Räumen Schlafzimmer und Technikraum 17 °C, in Wohn-, Kinder- und Gästezimmer 20 °C sowie zuletzt in WC und

Badezimmer 23 °C betragen – vgl. (Mercker & Arnold, 2017). Die Raumsolltemperaturen werden durch geregelte Wärmeeinträge der Heizkörper oder durch die weiter unten beschriebene Kühlung mittels Fensterlüftung und/oder Öffnen der Innentüren ganzjährig angestrebt.

LÜFTUNGSVERHALTEN

Um den Einfluss einer ERF auf die Gebäudeenergiebilanz sowie die Überhitzung im Aufstellraum der ERF aber auch der angrenzenden Räume valide bewerten zu können, ist eine möglichst realistische Abbildung des Lüftungsverhaltens erforderlich. Das Lüftungsverhalten unterteilt sich hierbei in die zwei Optionen: Fensterlüftung und Öffnen/Schließen von Innentüren im EFH. Beide Lüftungsoptionen können prinzipiell unabhängig voneinander auftreten und werden im Folgenden erst separat erläutert, bevor ein Ansatz zur primärenergetisch „sinnvollen“ Priorisierung beider Lüftungsvarianten vorgestellt wird.

Fensterlüftung

Das Gebäudemodell (Type 56) erlaubt es, jeder thermischen Zone, was im vorliegenden Fall jedem einzelnen Raum entspricht, eine zeitlich variable Luftwechselrate n_L als Eingangsgröße aufzuprägen. Auch in zurückliegenden Gebäudesimulationsstudien (vgl. hierzu bspw. Mercker & Arnold, 2017) wurde dies genutzt, um den Einfluss der Fensterlüftung vereinfacht abzubilden. Anstelle einer ganzjährig festen Luftwechselrate wird eine zweistufige Luftwechselrate verwendet, die zwischen einem Sockelwert von 0,4 h⁻¹ (vgl. Münzenberg et al., 2003) und einem Maximalwert von 1,2 h⁻¹ (entspricht dem geöffneten Fenster, vgl. Recknagel et al. 2007) variieren kann.

Der Übergang zwischen den beiden Werten der Luftwechselrate hängt von der in jedem Zeitschritt (von 1 min) neu zu bestimmenden Differenz zwischen dem Soll- und dem Istwert der jeweiligen Raumtemperatur sowie der Höhe der Außentemperatur T_{amb} ab. Wenn die Differenz ΔT zwischen der Raumisttemperatur $T_{R,i}$ und der Raumsolltemperatur $T_{R,Soll}$ den Wert $dT_{over,vent}$ von bspw. 2 K überschreitet (und somit eine Überhitzung vorliegt), wird geprüft, ob die Außentemperatur T_{amb} um einen Wert $dT_{amb,vent}$ von größer oder gleich bspw. 1 K unterhalb der Raumisttemperatur $T_{R,i}$ liegt – also, eine Abkühlung des Raumes durch Außenluftzufuhr erreicht werden kann. Sofern dies der Fall ist, wird der Raumluftwechsel vom Sockelwert auf den Spitzenwert erhöht. Der Spitzenwert des Raumluftwechsels wird beibehalten bis die Temperaturdifferenz ΔT auf den Wert $dT_{under,vent}$ von bspw. 0 K abgesunken ist – oder die Differenz zwischen Raumisttemperatur und Außentemperatur unter den Wert $dT_{amb,vent}$ gefallen ist. In allen anderen Fällen wird der Raumluftwechsel n_L mit dem Sockelwert von 0,4 h⁻¹ simuliert. Die **Abbildung 5** zeigt dieses „Regelkonzept“ für die Fensterlüftung grafisch.

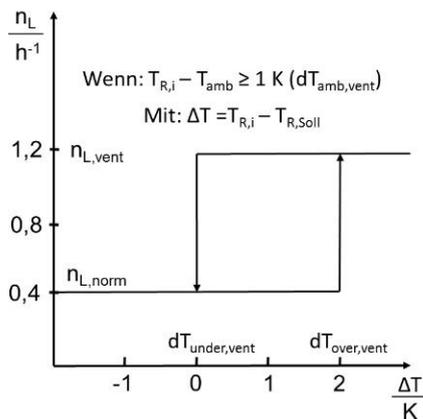


Abbildung 5: Regelkonzept der Fensterlüftung bei ausreichender Temperaturdifferenz zur Umgebung

Grundsätzlich ist dieser Regelungsansatz auch auf den Fall übertragbar, dass durch die Fensterlüftung der Raum beheizt werden könnte. Da ein solches Lüftungsverhalten jedoch als äußerst untypisch anzusehen ist bzw. keine praktische Relevanz hat, wird dieser Fall im Folgenden vernachlässigt.

Innentürlüftung

Eine detaillierte numerische Lösung des komplexen thermohydraulischen Problems konvektiver Wärmeübertragung durch Türöffnungen, wie sie zum Beispiel in (van der Maas, 1992) vorgenommen wird, ist in TRNSYS nicht umsetzbar. Die auf dem IEA Annex 23 basierende TRNSYS-Erweiterung TRNFLOW erlaubt eine für die Anforderungen von Systemsimulationen vereinfachte Abbildung von thermohydraulischen Problemen, indem der Ansatz zur Berechnung von thermischen Kapazitäts-Widerstands-Netzwerken um ein hydraulisches Pendant ergänzt wird (Luftknoten und Drücke kommen hinzu). Die daraus hervorgehenden (gekoppelten) Gleichungssysteme werden dann gemeinsam gelöst, was jedoch nicht nur einen deutlich erhöhten Rechenaufwand, sondern auch ein erhöhtes Risiko für das Auftreten von Konvergenzproblemen mit sich bringt. Aufgrund des „relativ hohen“ Modellierungsaufwandes bei gleichzeitigen Konvergenzrisiken wird auch dieser Ansatz für das vorliegende Projekt als ungeeignet verworfen.

Die Literaturstudie (Barakat, 1987) gibt einen Überblick über analytische Berechnungsansätze für den Wärmetransports durch offene Türen. Die Nusselt-Zahl Nu , die allgemein als Quotient von Wärmeübergangskoeffizient α , Türhöhe D und Wärmeleitfähigkeit λ definiert ist, lässt sich demnach auch in Abhängigkeit von der Prandtl-Zahl Pr , der Grashof-Zahl Gr und einer Konstante C ausdrücken:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot D}{\lambda} = C \cdot Pr \cdot Gr^{0,5} \quad (3)$$

Die Prandtl-Zahl Pr lässt sich wie folgt allein aus den Materialeigenschaften (hier: der Luft) bestimmen:

$$Pr = \frac{c_p \cdot \nu \cdot \rho}{\lambda} \quad (4)$$

Hierin ist c_p die isobare spezifische Wärmekapazität, ν die kinematische Viskosität, ρ die Dichte und λ die Wärmeleitfähigkeit der Luft. Für die Grashof-Zahl Gr wiederum gilt nach (Fischer et al., 2005) der Zusammenhang:

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot D^3}{\nu^2} \quad (5)$$

Neben der Erdbeschleunigung g taucht hierin noch der isobare Volumenausdehnungskoeffizient β auf, welcher für ideale Gase bei 20 °C mit 0,00341 K⁻¹ angegeben werden kann. Durch Einsetzen und Umformen der obigen Gleichungen 1, 2 und 3 in die allgemeine Formel für konvektive Wärmeströme:

$$Q = \alpha \cdot A \cdot \Delta T = \alpha \cdot D \cdot W \cdot \Delta T \quad (6)$$

lässt sich ein komfortabel in TRNSYS implementierbarer Zusammenhang für den Wärmestrom zwischen zwei Räumen mit der Temperaturdifferenz ΔT gewinnen:

$$Q = C \cdot c_p \cdot \rho \cdot W \cdot \sqrt{g \cdot D^3 \cdot \beta \cdot \Delta T^3} \quad (7)$$

Der Wärmestrom zwischen zwei Räumen Q kann also als Funktion der Breite der Türöffnung W , der Höhe der Türöffnung D , der Temperaturdifferenz zwischen beiden Räumen ΔT , der Erdbeschleunigung g und eines Koeffizienten C sowie der thermischen Eigenschaften der Luft ($c_p = 1,005$ kJ/(kg K), $\rho = 1,293$ kg/m) gemäß **Gleichung 5** bestimmt werden. Der notwendig einhergehende Kompromiss zwischen Berechnungszeit und -genauigkeit genügt dabei den Anforderungen des Projekts, da es zunächst „nur“ um die Bewertung grundlegender Effekte statt „exakte Ergebnisse“ geht.

Dieser Wärmestrom Q ist dabei nicht mit einem zusätzlichen (bidirektionalen) Luftwechsel verbunden, sondern entspricht einem gekoppelten Quell- und Senkenterm in den Energiebilanzen der am Wärmeaustausch beteiligten Räume.

Laut (Barakat, 1987) kann der Koeffizient C , der zur Anpassung des allgemeinen Berechnungsansatzes an ein spezielles Problem dient, Werte zwischen 0,2 und 0,4 annehmen. Um den Einfluss konvektiver Wärmeübertragung nicht zu überschätzen, wird den Simulationen im Referenzfall ein C von 0,2 zu Grunde gelegt. **Abbildung 6** zeigt Verläufe von Q für verschiedene C in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz ΔT zwischen den Räumen, wobei die Abmaße der Türöffnung mit $W = 0,83$ m und $D = 1,98$ m konstant gehalten werden:

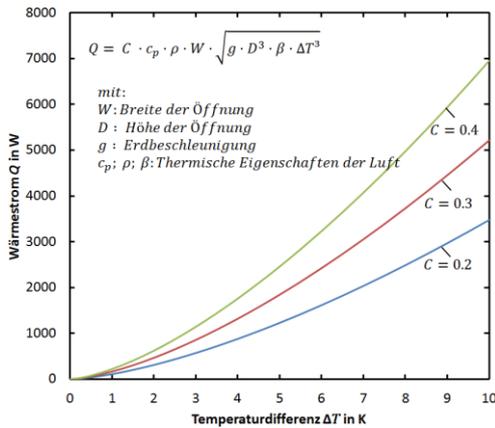


Abbildung 6: Konvektiver Wärmestrom Q zwischen zwei Räumen mit der Temperaturdifferenz ΔT für verschiedene Werte des Anpassungsfaktors C

Eine Temperaturdifferenz von 5 K, die auftreten kann, wenn im Wohnzimmer die ERF in Betrieb ist und die Tür zum unbeheizten Flur geöffnet wird, treibt einen konvektiven Wärmestrom von ca. 1,3 kW an. Eine tendenziell häufiger auftretendes ΔT von 1 K sorgt für einen Wärmestrom von knapp 100 W.

Zur Berücksichtigung variabler Türstellungen wird ein Türöffnungsgrad Δ_{door} eingeführt, der dann an die obige Gleichung 5 heranmultipliziert wird. Der Türöffnungsgrad kann Werte zwischen 0 und 100 % annehmen. Eine geschlossene Tür wird im Referenzfall mit einem Öffnungsgrad von 5 % berücksichtigt, da ein „luftdichter“ Abschluss nicht üblich ist (bspw. aufgrund von Schlüsseloch und Türspalt).

Der Türöffnungsgrad wird im Folgenden durch eine separate Regelung beeinflusst, die das Verhalten der BewohnerInnen nachbilden soll. Die Regelung prüft, ob die Raumsolltemperatur um einen Wert größer gleich 1 K überschritten wird. Liegt zur gleichen Zeit im benachbarten Raum eine um den Wert 0,5 K niedrigere Temperatur vor, wird der Türöffnungsgrad von seinem Sockelwert von 5 % auf einen Wert von 100 % erhöht. Dieser Zustand bleibt bestehen, bis die Raumisttemperatur wieder ihren Sollwert erreicht.

Priorisierung der Lüftungsvarianten

Um die Energieeffizienz eines Gebäudes zu erhöhen, ist eine gebäudeinterne Verteilung von Überschusswärme einem „Ablüften“ an die Umgebungsluft vorzuziehen. Zuerst sollten also die Innentüren zu angrenzenden Räumen geöffnet werden und erst wenn dieses Vorgehen nicht zur Vermeidung einer unerwünschten Überhitzung ausreicht, werden die Fenster geöffnet. Die beiden Lüftungsvarianten sind daher mit einer Priorisierung versehen. Durch Simulationen wird der Einfluss der Priorisierung quantifizierbar.

SIMULATIONSTUDIE

Um den Einfluss des konvektiven Wärmetransports durch geöffnete Fenster und Innentüren am Beispiel des beschriebenen EFH-Bungalows zu analysieren,

werden die wichtigsten Parameter der Regelungen zur Fenster- und Innentüröffnung variiert. Zugleich gibt diese Parameterstudie Aufschluss über die Sensitivität des Systemverhaltens (z. B. des Gebäudeenergiebedarfs) gegenüber Unsicherheiten bei der Vorgabe dieser Parameter bzw. Randbedingungen.

Relevante Parameter

Die TRNSYS-Simulationsstudie umfasst folglich den Mindestluftwechsel $n_{L, norm}$, den Maximalluftwechsel $n_{L, vent}$, die Einschalt-differenz zwischen der Soll- und der Isttemperatur eines Raumes $dT_{over, vent}$, die Mindestdifferenz zwischen der Raumist- und der Umgebungstemperatur $dT_{amb, vent}$ (siehe Abbildung 5), sowie den Anpassungsfaktor für den Wärmetransport durch Innentüren C (gemäß Abbildung 6).

Bewertungsgrößen

Zur Bewertung der Simulationen werden die vom Gaskessel und der ERF in das EFH eingetragenen Wärmemengen Q_{boiler} und Q_{ERF} ausgewertet. Zur Analyse dieser Ergebnisse werden zudem die Jahresmittelwerte der Raumtemperaturen im Flur und im Wohnzimmer (Aufstellraum der ERF) hinzugezogen.

Mindestwert der Raumluftwechselrate $n_{L, norm}$

Die erste Parametervariation umfasst den Mindestluftwechsel $n_{L, norm}$. Dieser wurde in 0,2 h⁻¹-Schritten zwischen 0 und 0,8 h⁻¹ variiert. Zudem wird für jeden Wert von $n_{L, norm}$ jeweils eine Simulation ohne ERF und eine mit ERF durchgeführt. Die nachfolgende Abbildung 7 zeigt die sich ergebenden Wärmeeinträge des Gaskessels und der ERF in den EFH-Bungalow auf der linken Abszisse zusammen mit den Jahresmittelwerten der Wohnzimmer- T_{LR} und Flurtemperatur T_{CO} auf der rechten Abszisse.

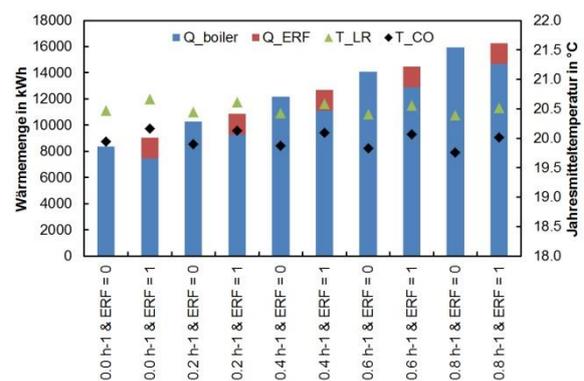


Abbildung 7: Wärmeeinträge des zentralen Wärmeerzeugers und der ERF für unterschiedliche Werte der Mindestluftwechselrate $n_{L, norm}$

Sowohl die absolute als auch die relative Differenz der Wärmeeinträge in den EFH-Bungalow zwischen den Simulationen mit/ohne ERF verringert sich mit zunehmender Mindestluftwechselrate. Das heißt, je dichter die Gebäudehülle, desto geringer ist der nutz

bare Anteil der von der ERF eingetragenen Wärmemenge. Während der Wärmeeintrag bei $n_{L, norm} = 0$ ohne ERF 8390 kWh („reine“ Transmissionsverluste abzüglich solarer Gewinne) und mit ERF 9059 kWh beträgt, was einer Differenz von 670 kWh bzw. 8 % entspricht, beläuft sich der Wärmeeintrag bei $n_{L, norm}$ von $0,8 \text{ h}^{-1}$ ohne ERF auf 15958 kWh und mit ERF auf 16267 kWh, was einer Differenz von 308 kWh bzw. 1,9 % entspricht. Zugleich sinken die Jahresmittelwerte der Wohnzimmer- und Flurtemperatur mit zunehmender Mindestluftwechselrate geringfügig ab (zwischen 0 und $0,8 \text{ h}^{-1}$ um rund 0,1 bis 0,2 K). Während die Wärmeeinträge in das EFH also nahezu linear mit der Mindestluftwechselrate ansteigen, nehmen die Mitteltemperaturen nur minimal ab.

Höchstwert der Raumlftwechselrate $n_{L, vent}$

Die zweite Parametervariation betrifft die Höhe der Raumlftwechselrate im Falle der Fensteröffnung $n_{L, vent}$. Diese wird in $0,4 \text{ h}^{-1}$ -Schritten zwischen einem Wert von $0,8 \text{ h}^{-1}$ und 2 h^{-1} variiert, während der Mindestluftwechsel $n_{L, norm}$ in allen Simulationen auf einen Wert von $0,4 \text{ h}^{-1}$ fixiert ist. Auch hier wird für jeden Wert von $n_{L, vent}$ je eine Simulation ohne ERF und eine mit ERF durchgeführt. In Abbildung 8 sind die resultierenden Wärmeeinträge des Gaskessels und der ERF in den EFH-Bungalow wieder auf der linken Abszisse zusammen mit den Jahresmittelwerten der Wohnzimmer- sowie der Flurtemperatur auf der rechten Abszisse dargestellt.

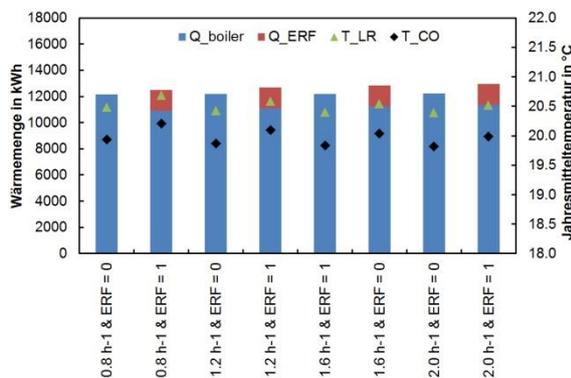


Abbildung 8: Wärmeeinträge des zentralen Wärmeerzeugers und der ERF für unterschiedliche Werte der Höchstluftwechselrate $n_{L, vent}$

Sowohl die absolute als auch die relative Differenz der Wärmeeinträge in das Gebäude zwischen den Simulationen mit/ohne ERF steigen mit größerem Höchstluftwechsel. Während bei einem Wert für $n_{L, vent}$ von $0,8 \text{ h}^{-1}$ der Wärmeeintrag ohne ERF 12141 kWh und mit ERF 12487 kWh beträgt, was einer Differenz von 347 kWh bzw. 2,9 % entspricht, beträgt der Wärmeeintrag bei einem Wert für $n_{L, vent}$ von 2 h^{-1} ohne ERF 12218 kWh und mit ERF 12940 kWh, was einer Differenz von 721 kWh bzw. 5,9 % entspricht. Erneut sinken die Jahresmittelwerte der Wohnzimmer- und Flurtemperatur mit steigender Höchstluftwechselrate

geringfügig ab (zwischen $0,8$ und 2 h^{-1} um rund $0,1$ bis $0,2 \text{ K}$). Die Wärmeeinträge in den EFH-Bungalow nehmen degressiv mit der Höchstluftwechselrate $n_{L, vent}$ zu, während die Mitteltemperaturen nur geringfügig abnehmen.

Anpassungsfaktor für interne Konvektion C

Die dritte Parametervariation betrachtet den Anpassungsfaktor C für den konvektiven Wärmetransport über offene Innentüren gemäß Gleichung 5. Neben den Simulationen, in denen bei einer Überschreitung der Raumsolltemperatur um 1 K die Innentür des betroffenen Raumes zum (mindestens $0,5 \text{ K}$ kälteren) Flur geöffnet wird – wobei der Faktor C Werte von $0,2$; $0,3$ und $0,4$ annimmt – werden noch Grenzfälle simuliert, bei denen die Innentüren entweder immer auf oder immer zu sind. Jede dieser Konfigurationen wird zudem einmal mit und einmal ohne ERF betrachtet. Hieraus ergeben sich die in **der Abbildung 9** gezeigten Wärmeeinträge in das EFH (linke Abszisse) sowie die zugehörigen Jahresmittelwerte der Wohnzimmer- und Flurtemperatur (rechte Abszisse).

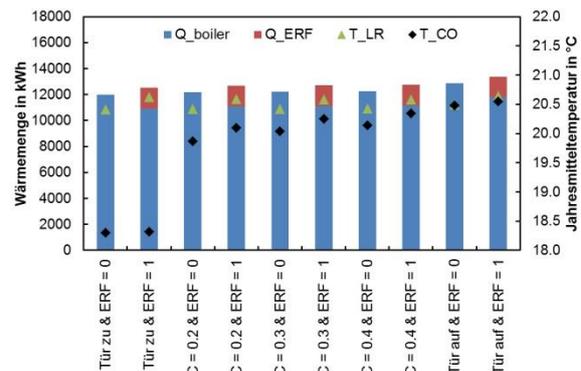


Abbildung 9: Wärmeeinträge des zentralen Wärmeerzeugers und der ERF für unterschiedliche Werte des Anpassungsfaktors für interne Konvektion C

Sobald die Öffnung der Innentüren zur Kühlung berücksichtigt wird, ist der Wärmeeintrag in das EFH nahezu unabhängig vom gewählten C -Wert. So ergibt sich ein Wärmeeintrag von 12182 kWh für ein C von $0,2$ und von 12258 kWh für ein C von $0,4$ – eine Verdopplung von C steigert den Wärmeeintrag um $0,6 \%$ (jeweils ohne ERF). Analoge Ergebnisse sind für die Simulationen mit ERF auszumachen, wo für C gleich $0,2$ ein Wärmeeintrag von 12674 kWh und für C gleich $0,4$ ein Wert von 12750 kWh auftritt. Eine Veränderung in den Jahresmitteltemperaturen zeigt sich am deutlichsten für den Flur, wobei eine Verdopplung von C auf $0,4$ einen Flurtemperaturanstieg von $0,24 \text{ K}$ verursacht (jeweils mit ERF).

Etwas größere Unterschiede ergeben sich im Vergleich mit den Grenzfällen: „Innentüren immer zu“ und „Innentüren immer auf“. Der Jahresmittelwert der Flurtemperatur bewegt sich zwischen $18,3 \text{ °C}$ (Türen immer zu & ohne ERF) und $20,6 \text{ °C}$ (Türen immer auf & mit ERF). Der Mehrenergiebedarf für den Fall ohne Innentüröffnung und ohne ERF-Betrieb verglichen

mit dem Fall mit permanenter Innentüröffnung und ohne ERF-Betrieb beträgt 880 kWh bzw. 7,3 %.

Einfluss der Temperaturkriterien

Die vierte Parametervariation betrifft hauptsächlich das Temperaturkriterium $dT_{over,vent}$, also die Differenz der Raumist- zur Raumsolltemperatur, ab der eine Fensterlüftung erfolgt – sofern die Außenluft um mindestens $dT_{amb,vent} = 1$ K kälter als die Raumisttemperatur ist. Die Lüftung durch das Öffnen von Innentüren erfolgt nach analogen Kriterien, wobei die zugehörige Differenz der Raumist- zur Raumsolltemperatur $dT_{over,conv}$ auf die Hälfte von $dT_{over,vent}$ festgelegt ist, damit stets zuerst die Innentüren und dann die Fenster geöffnet werden. Die Temperaturdifferenz zum Flur $dT_{CO,conv}$ muss dabei mindestens 0,5 K betragen (und somit die Hälfte von $dT_{amb,vent}$) – vergleiche hierzu Abbildung 5.

Variiert wird $dT_{over,vent}$ zwischen 1 und 5 K mit einer Schrittweite von 1 K. Zugleich wird $dT_{over,conv} = dT_{over,vent}/2$ in 0,5 K-Schritten mitverändert. In allen Simulationen wird die ERF betrieben und die Raumkühlung kann durch das Öffnen der Innentüren erfolgen. Für den Anpassungsfaktor C wird meist ein Wert von 0,2 verwendet. Nur für den relativ großen Wert von $dT_{over,vent}$ von 4 K wurden zwei Vergleichssimulationen mit $C = 0,3$ bzw. 0,4 durchgeführt. Die summierten Wärmeeinträge Q_{ges} des Gaskessels und der ERF zeigt **Tabelle 3** gemeinsam mit den Jahresmittelwerten der Wohnzimmer- und Flurtemperatur.

Tabelle 3: Einfluss des Temperaturkriteriums $dT_{over,vent}$ auf Mitteltemperaturen und Gesamtwärmeeintrag in den EFH-Bungalow

$dT_{over,vent}$ [K]	C [-]	T_{LR} [°C]	T_{CO} [°C]	Q_{ges} [kWh]
1	0,2	20,55	20,16	12771
2	0,2	20,59	20,10	12674
3	0,2	20,64	20,12	12619
4	0,2	20,70	20,16	12572
4	0,3	20,70	20,32	12597
4	0,4	20,69	20,42	12619
5	0,2	20,78	20,21	12457

Es zeigt sich, dass eine Anhebung der Temperaturgrenze $dT_{over,vent}$ von 1 auf 5 K für eine Verringerung des Gesamtwärmeeintrags um 314 kWh bzw. 2,5 % sorgt. Zugleich steigen auch die Jahresmittelwerte der Wohnzimmer- und Flurtemperatur für größer werdende $dT_{over,vent}$ geringfügig (ca. 0,2 K). Je später gelüftet wird, desto höher ist die Mitteltemperatur und desto länger bleibt die gelieferte Wärme im Gebäude (und muss nicht neu erzeugt werden). Der Einfluss des Anpassungsfaktors C ist jedoch auch bei größerem $dT_{over,vent}$ von 4 K relativ gering, so dass eine Verdopplung von C lediglich zu einem Mehrwärmeeintrag von 47 kWh bzw. 0,4 % führt.

Eine weitere Parameterstudie variiert die für eine Lüftung notwendige Temperaturdifferenz zur Umgebung $dT_{amb,vent}$ (und damit zugleich die zum Flur

$dT_{CO,conv} = dT_{amb,vent}/2$) mit Werten von 1; 2; 3 und 4 K. Der Gesamtwärmebedarf ändert sich lediglich zwischen 12674 kWh und 12646 kWh, was einer relativen Differenz von 0,15 % entspricht. Analog ist nahezu kein Einfluss auf die Jahresmittelwerte der Wohnzimmer- und Flurtemperatur festzustellen.

Einfluss des Lüftungskonzepts

In einer letzten Parameterstudie wird analysiert, wie sich die Berücksichtigung einer Erwärmung eines Raumes durch die Öffnung von Innentüren auswirkt. Diese „Betriebsstrategie“ verhält sich analog zum Abkühlungsfall mit „umgekehrten Vorzeichen“. Als Temperaturkriterien werden $dT_{over,conv} = 2$ K und $dT_{CO,conv} = 0,5$ K angesetzt. In allen Simulationen wird die ERF betrieben. Als Anpassungsfaktor C werden 0,2 bzw. 0,4 verwendet, was zu den in der **Tabelle 4** gezeigten Ergebnissen führt.

Tabelle 4: Einfluss der Erwärmung durch Innentüröffnung auf Mitteltemperaturen und Gesamtwärmeeintrag in den EFH-Bungalow

Erwärmen via Innentüren	C [-]	T_{LR} [°C]	T_{CO} [°C]	Q_{ges} [kWh]
Nein	0,2	20,70	20,16	12572
Ja	0,2	20,70	19,85	12523
Nein	0,4	20,69	20,42	12619
Ja	0,4	20,69	19,86	12524

Werden die Innentüren auch zum Erwärmen eines Raumes geöffnet, so verringert sich der Gesamtwärmeeintrag ins Gebäude um 49 kWh für $C = 0,2$ bzw. 95 kWh für $C = 0,4$. Auch der nicht nutzbare Anteil der ERF-Wärmelieferung fällt in diesem Fall geringer aus. Die Jahresmitteltemperatur im Wohnzimmer verändert sich kaum, im Flur lassen sich geringe Differenzen von 0,3 bis 0,4 K feststellen.

Diskussion

Die Parametervariation zeigt, dass die Mindestluftwechselrate $n_{L,norm}$ aus Abbildung 5 eine sensitive Größe für den Gebäudewärmebedarf darstellt, deren Einfluss mit steigendem Gebäudedämmstandard zunimmt. Eine sorgfältige Vorgabe von $n_{L,norm}$ ist daher von großer Bedeutung – alternativ ist eine Variation von $n_{L,norm}$ in einem „realistischen“ Wertebereich durchzuführen, um die Sensitivität der Simulationsergebnisse gegenüber Unsicherheiten bzgl. dieser Größe bestimmen zu können. Daneben zeigt sich, dass mit zunehmender Heizlast (d. h. mit steigendem $n_{L,norm}$) der nutzbare Anteil des ERF-Wärmeeintrags in das EFH ansteigt, während größere Werte des Luftwechsels bei Fensterlüftung $n_{L,vent}$ zu einer Erhöhung des nicht nutzbaren ERF-Wärmeeintrags in das EFH führen.

Die Parameterstudien zeigen zudem, dass es für die Energiebilanz des EFH wichtiger ist, die Fenster- und Innentürlüftung „überhaupt“ zu berücksichtigen, als auf die Vorgabe möglichst „exakter“ Werte für die

Temperaturkriterien $dT_{over,vent}$, $dT_{amb,vent}$, $dT_{over,conv}$ und $dT_{CO,conv}$ sowie den Anpassungsfaktor C zu achten.

In welchem Umfang diese Beobachtungen auf das oben beschriebene Regelungskonzept selbst zurückzuführen sind, sollte in weiterführenden Untersuchungen betrachtet werden. Die Berücksichtigung von Mindestlüftungsdauern im Falle einer Fensteröffnung wäre hier eine Erweiterung, die bspw. den Einfluss des Höchstluftwechsels $n_{L,vent}$ verstärken sollte. Die bisherige Regelung sorgt statt dessen dafür, dass eine schnellere Abkühlung stets zu einem schnelleren Ende des Lüftungsvorgangs führt, wodurch wohl hauptsächlich dynamische Unterschiede auftreten, die Bilanzen jedoch „relativ“ unverändert bleiben. Zudem sollten die vorliegenden Ergebnisse in einer Folgeuntersuchung mit der detaillierteren Abbildung in TRNFLOW verglichen (bzw. validiert) werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Der Tagungsbeitrag geht auf die Modellierung des konvektiven Wärmetransports durch offene Fenster und Innentüren eines EFH in Bungalow-Bauweise in TRNSYS ein. Neben einleitenden Informationen zum Gebäude- und Anlagenmodell liegt der Schwerpunkt auf der Abbildung des konvektiven Wärmetransports in TRNSYS. Anstelle einer detaillierten Abbildung mit dem Zusatzpaket TRNFLOW wird ein einfacher analytischer Ansatz vorgestellt und bewertet. Der maximale Unterschied im Gebäudeenergiebedarf beträgt im vorliegenden EFH knapp 7,5 %. Für Simulationen mit Mehrzonengebäuden, die unterschiedliche Raumsolltemperaturen aufweisen oder – bspw. aufgrund von ERF – zeitweise „hohe“ Übertemperaturen in einzelnen Räumen aufweisen, ist der obige Modellierungsansatz zu empfehlen.

DANKSAGUNG

Das dieser Veröffentlichung zugrunde liegende Verbundprojekt „Optionen zum netzdienlichen Betrieb von Einzelraumfeuerstätten (OptDienE)“ wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter den Förderkennzeichen 03KB138 A und B aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages gefördert.

Die Arbeiten erfolgen in Kooperation mit dem Deutschen Biomasseforschungszentrum (DBFZ). Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt ausschließlich bei den Autoren.

LITERATUR

Barakat, S. A. 1987. Inter-Zone Convective Heat Transfer in Buildings: A Review. *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 109/71

DIN V 18599-10, 2007. Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten, Beuth Verlag, Berlin

Fischer, K.-F., et al. 2005. Taschenbuch der technischen Formeln, C. Hanser Verlag, Leipzig

Heimrath, R., Haller, M. 2007. The Reference Heating System, the Template Solar System of Task 32, A Report of IEA Solar Heating and Cooling programme - Task 32: “Advanced storage concepts for solar and low energy buildings”. Report A2 of Subtask A. Institute of Thermal Engineering, Graz University of Technology, Graz

Jordan, U., Vajen, K. 2003. Handbuch – DHWcalc, URL: solar.umwelt-uni-kassel.de/download.php?systemid=94551da49088c319f498, Abgerufen am: 27.02.2015

Lenz, V., Müller-Langer, F., Denysenko, V., Daniel-Gromke, D., Rensberg, N., Rönsch, C., Janczik, S., Kaltschmitt, M. 2017. Erneuerbare Energien. BWK 69 Nr. 5, S. 54-77

Loga, T., Stein, B., Diefenbach, N., Born, R. 2015. Deutsche Gebäudetypologie – Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden, Institut für Wohnen und Umwelt, Darmstadt

Mercker, O., Arnold, O. 2017. Ansätze zur Reduktion der konventionell erzeugten Wärmeverteilerluste in solar unterstützten Mehrfamilienhäusern. Projektabschlussbericht Institut für Solarenergieforschung, Hameln

Mercker, O., Pärish, P., Büchner, D. 2020. Simulationsstudie zum Potenzial netzdienlicher Betriebsweisen von Biomasse-Einzelraumfeuerstätten in TRNSYS – Methodik, Randbedingungen und Modelle. Tagungsband 3. Regenerative Energietechnik Konferenz, Nordhausen

Münzenberg, U., Weithaas, T., Thumulla, J. 2003. Luftwechsel im Gebäudebestand - Natürlicher Luftwechsel, Fensterlüftung und die Notwendigkeit von Lüftungskonzepten, 7. Pilztagung des VDB, Stuttgart

Recknagel, H., Sprenger, E., Schramek, E. 2007. Taschenbuch für Heizung und Klima, Oldenbourg Industrieverlag, München

van der Maas, J. 1992. Air flow through large openings in buildings. Technical Report Annex 20: Air Flow Patterns within Buildings – Subtask 2: Air Flow between Zones. International Energy Agency, Lausanne

III: HVAC systems and large scale seasonal thermal energy storage

COMPARISON OF STATIONARY AND TRANSIENT RANS MODELLING TO PREDICT THE SPATIAL VELOCITY FIELD OF A CEILING INTEGRATED FAN

O. Glahn^{1,2}, T. Voß², K. Voss² and S. Schwickert¹

¹Institute Future Energy, OWL University of Applied Sciences and Arts, Lemgo, Germany

²Dep. Building Physics & Technical Services, University Wuppertal, Wuppertal, Germany

ABSTRACT

Ceiling fans allow an increase of the local air velocity on the human body. The associated heat transfer increases user's temperature tolerance in warm environments.

In the presented study, the differences in the application statistical turbulence models (RANS) for modelling the air flow induced by a ceiling integrated fan is outlined with particular focus on comparing steady and transient simulations. Results of a CFD simulation (Fluent) are shown and compared with measured data of the horizontal velocity distribution.

The study shows that especially the transient simulation using the Realizable k - ϵ model follows the flow pattern described in literature. But at 1.1 m above the floor, the mean absolute error in the center of the jet is at least five times larger than the measurement uncertainty and 41 % higher than the measured values. The stationary model using the Multiple Reference Frame (MRF) approach instead, shows the smallest mean absolute error, exceeding the measured values in the center of the jet by 16%. But in the immediate vicinity of the fan an unrealistic velocity distribution can be observed, if the moving zone needs to be small due to obstacles. For a freely suspended ceiling fan, the moving zone can be adjusted accordingly and the flow pattern can be improved. But modelling a ceiling integrated fan with a fan housing and obstacles in the near region, transient simulations using rigid body motion are required for accurate results.

INTRODUCTION

The ceiling fan spatial velocity distribution, as it is subject of this study, is part of a research field several international research groups are currently working on (Chen et al., 2018; Gao et al., 2017; Liu, Lipczynska et al., 2018; Voss & Voß, 2016; Wang, Luo et al., 2019).

The velocity field induced by a ceiling fan increases human body heat dissipation and results in a higher temperature tolerance in warm environments. Beside the velocity, field studies also analyze human perception of air velocities, using questionnaires (Brager et al., 2004; Melikov, 2004; Pasut et al., 2014; Risetto et al., 2020; Zhai et al., 2017) and investigate

the usage of ceiling fans by the occupants (Schweiker & Wagner, 2016). Other studies analyze potentials to increase night cooling (Rizk et al., 2015; Voss et al., 2013) or the control of stand fans to achieve a homogeneous velocity distribution (Liu, Le Yin et al., 2018). Another study investigated the ceiling fan blade optimization for improved aerodynamic performance (Adeeb et al., 2016).

One of the central research objectives is to derive design criteria for the integration of ceiling fans in room climate concepts. The ASHRAE is currently also developing a standard for measuring the spatial velocity distribution of ceiling fans (ASHRAE, 2018).

This study focuses on the air flow distribution of fans that are integrated in a suspended ceiling-panel and particularly emphasizes on boundary conditions for CFD simulations. Obstacles close to the rotor, like the fan housing as well as the panel, imply limitations in modelling. Methods used in literature to do CFD simulations on ceiling fans can only be applied to a limited extend. Therefore, the behavior of transient RANS modelling with rigid body motion (RBM) gets investigated for application in ceiling fan CFD modelling.

Thermal Comfort

Increased air velocities enhance the convective heat dissipation and evaporation of the human body. (Arens et al., 2009; Tanabe & Kimura, 1994). From an air speed of approx. 0.1 m/s, free convection is superposed by forced convection and the heat flow increases (Fanger, 1970; Melikov, 2004). At seated activity (MET 1.3) and summer office clothing (CLO 0.7: e.g. long trousers, shoes and shirt), air velocities can also be perceived from as low as 0.05 m/s (Brager et al., 2004). Furthermore the evaporation on the human body increases exponentially degressively with increasing air velocity (Candas et al., 1979).

Studies show that an environment with 27.5-30 °C and air velocities of 0.8-1.0 m/s can be perceived as comfortable (Huang et al., 2013; Rohles et al., 1982; Xia et al., 2000; Zhai et al., 2017). It can be deduced from this, that controlling the air speed in warm environments can increase the thermal comfort band and thus offer potential for energy savings. In cool to mild summer climate regions (Berlin, Helsinki) air velocities of up to 0.8 m/s can be expected to save 34 % - 48 % of net cooling energy in total, depending on

the temperature setpoint (Schiavon & Melikov, 2008). Besides that, ceiling fans enable the compensation of active cooling in German summer climate regions, as long as no extreme summer conditions prevail. This allocates additional savings in investment and operation costs. (Glahn, 2016)

To avoid draft, it is recommended to keep velocities below 0,8 m/s to 1,0 m/s. Therefore the operative room temperature, which is still considered comfortable, can thus be increased by a maximum of 3 K. (Cândido et al., 2011; Pasut et al., 2014; Rohles et al., 1982). These requirements are also considered in current international standards (ASHRAE Standard 55-2017; DIN EN 16798-1:2015-Draft; DIN EN ISO 7730:2006-05; DIN EN 15251:2012-12). However, studies show that under very warm conditions (>28 °C), higher air speeds of up to 1.4 m/s can also be perceived as comfortable (Zhai et al., 2017).

The thermal sensation between different body regions varies significantly (Y. Zhang & Zhao, 2007). Ceiling fans offer a more homogeneous velocity field compared to table and stand fans. Therefore they are perceived as more comfortable than other systems. (Schiavon & Melikov, 2009)

In consideration of the individual thermal perception, that could differ significantly between occupants (de Dear & Brager, 1998; Kim et al., 2019; Nicol & Humphreys, 2002), especially systems that enable control over individual comfort conditions are of particular interest. These systems have high potential in improving thermal comfort perception as well as energy consumption. Furthermore it can be expected, that the opportunity of individual occupant control results in further, psychologically driven, comfort effects (Brager et al., 2004; Luo et al., 2016). Therefore, systems that influence only a single workplace and not the air speed at the adjacent workplaces appear to be most interesting. In that consideration, this study focuses on ceiling fans with a diameter of 30 cm.

Airflow pattern induced by ceiling fans

The spatial airflow distribution, induced by the ceiling fan can be assigned to have the characteristics of a free shear flow. Here the jet width increases proportional to the fan distance. The jet reduces the speed with increasing distance and at the same time carries along new still air from the surrounding (Oertel & Prandtl, 2017). Based on this instance, the air flow pattern can be characterized in different zones, whereas the explicit velocity field within the jet is influenced by the blade rake and rotational speed (Aynsley, 2007).

In Wang, Luo et al. (2019) and Wang, Zhang et al. (2019) the characteristic velocity distribution based on a "color sequence particle streak velocimetry" (CSPSV) is divided into six zones as follows. There is the jet core, with the maximum velocities increasing radially from the center to the outer diameter of the fan. Adjacent to the jet is the entrainment zone where the ambient air is entrained by the jet. Near the floor the air flow spreads in the spreading zone. From there

the air moves towards the wall and flows within the wall zone upwards. In the room between the jet and the wall is the recirculation zone. Within that zone the air flows from the wall back towards the floor and circulates. The sixth zone is located above the ceiling fan and is called suction zone. Comparable characterizations can also be found in Liu, Lipczynska et al. (2018) and Gao et al. (2017).

Review of methods for modelling a ceiling fan induced velocity field

The principal challenge in modeling turbulent flows is to achieve representative results with adequate computing effort. Consequently, statistical turbulence models (RANS) have been used in all reviewed works that executed numerical investigations on ceiling fan velocity fields. The turbulence models available in commercial CFD programs are based on certain assumptions and are therefore not equally suitable for all types of flows found in a room. The behavior of different turbulence models in enclosed environments is summarized in Z. Zhang et al. (2007). There, the ν_2f -dav and the RNG k - ϵ show the best accuracy for flows with forced and mixed convection.

When modelling a ceiling fan in a room, several forms of turbulent flow can be found. Consequently, a single turbulence model can only be used to a limited extent.

The flow at the blade corresponds to the flow around a body and requires a precise, spatially high-resolution calculation of the boundary layers and wall turbulence. The outflow into the empty space is characterized by a free shear flow, which has large Reynolds numbers in the center of the jet, that decrease with increasing distance from the fan as well as in width. In addition, the momentum emanating from the fan contains swirl components that influence this free shear flow. Another factor that influences the flow distribution is the floor or any furniture. As an obstacle, these deflect the jet, so that a calculation of the boundary layer near the obstacle is necessary.

Although the boundary conditions of a rotating fan are transient, most CFD analyses are based on stationary calculations (Adeeb et al., 2016; Casseer & Ranasinghe, 2019; Chen et al., 2018; H.-H. Lin, 2019; S.-C. Lin & Hsieh, 2014; Momoi et al., 2004; Zhu et al., 2014). Here, the rotation was usually modelled via a Multiple Reference Frame (MRF). In Momoi et al., 2004 instead, a measured flow field both below and above the fan was imposed as a boundary condition.

In Babich et al. (2017) a transient simulation was performed, but without considering the fan geometry. The momentum was implemented in the model as a source in the form of a rotating ring.

The turbulence models used in these studies differ. In Bassiouny and Korah (2011), Chen et al. (2018), H.-H. Lin (2019), S.-C. Lin and Hsieh (2014) and Momoi et al. (2004) the Standard k - ϵ was used; in Zhu et al. (2014) and Franzke and Sebben (2018) instead, the Realizable k - ϵ model was applied. According to

ANSYS (2017) the Realizable k - ϵ model has substantial benefits in calculating rotating flow structures compared to the Standard k - ϵ model.

In Adeeb et al. (2016) the Spalart-Allmaras turbulence model showed the best agreement with velocity measurements at 1.5 m distance from the fan. This was compared with the Standard k - ϵ and the k - ω model. Casseer and Ranasinghe (2019) came to the same result, where the Spalart-Allmaras turbulence model also shows the best agreement with the axial velocity measured at the end of a round duct compared to the Standard k - ϵ , RNG k - ϵ , as well as k - ω model.

In the transient calculation considering the fan as a momentum source, the Shear Stress Transport k - ω (SST k - ω) model showed advantages over the Standard k - ϵ , RNG k - ϵ , as well as k - ω model (Babich et al., 2017).

Reflection and Objective

Summarizing these studies, the Realizable k - ϵ , the SST k - ω model as well as the Spalart-Allmaras turbulence model are from particular interest to model ceiling fans and their spatial velocity field in a room.

Even the $v2f$ -dav model is recommended for flows with forced and mixed convection (Z. Zhang et al., 2007), there is no experience found in the application of the $v2f$ -dav model with rotating fans. Therefore, it is not further investigated in this study. Furthermore, the Spalart-Allmaras is also not considered further in this study because it is not calibrated for free shear flows according to ANSYS (2017).

The Realizable k - ϵ model is a development of the Standard k - ϵ model, which is a two-equation model solved by the transport equations of turbulent kinetic energy k and turbulent dissipation ϵ . The Realizable k - ϵ model was developed because experiments had repeatedly shown that the Standard Model does not provide realistic results for large deformations. For the Realizable k - ϵ model the equation for the dissipation rate was modified and an alternative formulation of the turbulent viscosity was introduced. Here, the constant C_μ from the Standard Model is solved by a functional relation to the deformation rate and mean rotation (Schwarze, 2013; Shih et al., 1995).

A further development of the Standard k - ϵ model is also the RNG k - ϵ model, which contains several refinements that lead to improved results in swirling flows. Principally it is suitable for a wide class of flows and contains also an additional term in the dissipation equation that improves the accuracy for rapidly strained flows. (ANSYS, 2017; Schwarze, 2013; Yakhot et al., 1992) It is also recommended for enclosed room simulation with forced or mixed convection (Z. Zhang et al., 2007). In Babich et al. (2017) and Casseer and Ranasinghe (2019) however, the RNG k - ϵ model did not show sufficient agreement with measurement results in modelling the spatial ceiling fan flow. Therefore, it will not be considered in the analyses below.

In Babich et al. (2017) SST k - ω model showed the best agreement with the spatial measurement in a transient ceiling fan simulation. In the following analysis the Transition SST model is used instead. This is a coupling of the SST k - ω transport equations with two further transport equations, one for the formulation of the intermittency and another one for the transition criteria, based on the momentum-thickness Reynolds number. The Transition SST model is optimized for mapping laminar boundary layer or boundary layer separation in a transition point. However, it is limited to wall-bounded flows and therefore not applicable for free shear flow regions, since these will be assumed to be completely turbulent according to the Standard k - ϵ model. (ANSYS, 2017)

In the available literature on modelling ceiling fans and distant spatial velocity distribution in a room, there are no transient simulations described, that consider the fan geometry and apply rigid body motion (sliding mesh). In Franzke and Sebben (2018) and Franzke et al. (2019) this method was investigated for a vertically clamped axial fan. They focused particularly on the velocity field in 4 mm distance to the fan including obstacles and a heat source close to the intake and outlet. But the distant spatial velocity field in the room has not been examined. They concluded in their study, that the MRF approach shows non-physical behavior in the downstream region and that a larger rotating zone could improve that behavior. But this is not possible, if stationary parts like a ceiling panel or a housing surrounds the fan. Furthermore, most of the existing studies used freely suspended ceiling fans with a diameter of 1.2-1.4 m. In this study instead, a fan with a diameter of 30 cm, integrated in a ceiling panel is examined in order to analyze the potential of individual control due to the narrow region of influence.

SIMULATION AND EXPERIMENT

The main focus of the analysis is the methodological comparison of different RANS models to predict the velocity distribution of a ceiling integrated fan.

Measurements

Measurements of the radial velocity field in 1.1 m above the floor (head of a seated person according to EN ISO 7726:2001) are used to validate the results in the relevant occupied zone. The fan speed was set to 265 rpm to have a maximum mean velocity of approx. 0.6 m/s in the occupied zone. The measurements were performed in an empty room (54 m²). The fan was mounted centered in the room with a radial distance of approx. 3.57 m to surrounding walls. During the measurements there were no flow obstacles or thermal loads in the room and no ventilation was performed. The ceiling panel with the fan was suspended at a distance of 2.5 m from the floor. To limit the suction zone compared to a real office situation with a room height of approx. 2.8 m, an additional panel (size: 1.5 m x 1.2 m) was placed at a distance of 20 cm above the fan, 28 cm above the panel respectively (see Figure 1). Comparing with simulation results (see figure 3) it

is expected that this additional panel covers the entire suction zone with air velocities above 0.1 m/s. Nevertheless, it allows only an indicative transferability to an office room with a room height of 2.8 m.



Figure 1: Measurement Setup (University Wuppertal)

The air velocity was measured with 8 omnidirectional hot-wire anemometers of the type FV A605 TA1 (Ahlborn) (measuring range 0.01 to 1 m/s; accuracy $\pm 1\%$ of the final value and $\pm 1.5\%$ of the measured value). These were mounted with a distance of 20 cm. Eight radial measurement series with an angular distance of 45° were taken. Two measurements were carried out for each position using two different sensors (measurement duration: 5 minutes with a sample frequency of 300 ms). The mean of the mean velocity from these radial measurement series is plotted in figure 2 assuming a symmetrical distribution and accounting corresponding deviations in the experimental uncertainty (displayed as error bars).

The experimental uncertainty u_D is based on the systematic standard uncertainty calculated according to (ASME V&V, 2009).

$$u_D = b_v = \sqrt{b_{v\,cal}^2 + b_{v\,sens}^2 + b_{v\,env}^2} \quad (1)$$

With the systematic standard uncertainty for velocity b_v , the calibration uncertainty $b_{v\,cal}$, the conceptual uncertainty from the sensor setting $b_{v\,sens}$ and the conceptual uncertainty from the environment $b_{v\,env}$.

Due to the turbulent flow, the standard deviation of the measurement series could not be used to describe the measurement uncertainty. Therefore, the conceptual uncertainty is estimated by taking multiple measurements of a position or radial distance and calculating the standard deviation of the different mean velocities.

For $b_{v\,sens}$ test measurement series were taken with all applied sensors during fan operation at selected positions with a duration of 9 min and a sample rate of 300 ms. The uncertainty is derived from a corresponding regression curve, based on a function of the absolute mean air velocity. For $b_{v\,env}$ the standard deviation of mean velocities for each radial distance from the radial measurement series were used to account deformations in the velocity distribution due to environmental impacts. For example, these could be air leakages at the façade, pressure differences to neighboring rooms or uncertainties in mounting the panel and fan.

Geometry and Mesh

The simulation model is based on the measurement environment. For simplification and transferability to office situations, a homogeneous ceiling with 28 cm distance to the panel got implemented. Compared to the measurements, uncertainties could arise, because the experimental setup only considered this lower ceiling to a limited extend.

The fan model is based on a 3D scan with an Artec Eva scanner (nominal 3D point accuracy: 0.1 mm). The fan geometry in the CFD model did not include the protection cover underneath the rotor in order to reduce meshing effort and calculation time.

For the study a model is used with a mesh of 2.84 million tetrahedral and hexahedral cells. The minimum orthogonal quality is 0.136. The fan is meshed with an element size of 0.5-4 mm. The cell sizes of the other regions vary according to the expected speed gradients (underneath the fan: 5 mm, the panel cutout: 1 cm, the space underneath the panel: max. 4 cm, enclosing space max. 7.5 cm, above the fan max. 5 cm; max. growth rate: 1.2).

In addition, a mesh sensitivity analysis was performed using a mesh that was 1.4 times finer in each of the distinctive regions. A mesh-dependent error of up to 10 % was found in the center of the fan. However, the focus of this study is on methodological comparison, so that the initial mesh was considered sufficient.

Boundary Conditions CFD Simulation

The simulations were performed with the Ansys Fluent software (version 19.2). The different models, that were considered in the course of the investigation, are summarized in Table 1.

Steady-state and transient modelling will be compared using RANS models in order to highlight the differences when the transport equations for each time step of a rotor motion are solved. The MRF method is used in the steady-state calculation. In the transient solution the fan is modeled in form of the Rigid Body Motion (RBM), also called sliding mesh.

Table 1: Model Conditions

	TIME	RANS	PRESSURE
V1	steady	Realizable $k-\varepsilon$	SIMPLE
V2			Coupled
V3			SIMPLE
V4	transient		Coupled
V5	Transition SST		PISO

In addition, differences between the SIMPLE pressure correction equation and the coupled solution in the relevant flow areas are outlined. In general, it can be assumed that the simultaneous solution of the flow variables (velocity, pressure, enthalpy and temperature) takes better account of the interactions of the corresponding variables. So, rotating objects should be better represented. With the exception of Adeeb et al. (2016), sequential solutions were always used in the available studies (with documented pressure solution). A corresponding comparison could not be taken from the available literature.

In order to build on the experience from the summarized literature in the introduction about modelling ceiling fans, the Realizable $k-\varepsilon$ model is selected to compare steady and transient methods. The Transition SST was selected additionally for this study to analyze and compare it with the Realizable $k-\varepsilon$ model in modelling the blade velocity profile.

In the Realizable $k-\varepsilon$ model the mean rate of rotation tensor contains an additional rotation term ($-2\varepsilon_{ijk}\omega_k$), which can lead to incorrect results in simulations with rotating objects, so that this additional term was deactivated for the simulations considered here (ANSYS, 2017). The near wall region has been modelled using the "Enhanced Wall Treatment". Here, the whole domain is subdivided into a "viscosity-affected region and a fully-turbulent region" by a wall-distance-based turbulent Reynolds number. These regions are solved separately and blended by means of a two-layer formulation (ANSYS, 2017).

ANALYSES AND DISCUSSION OF RESULTS

Results

The simulations show that the blade geometry of the rotor leads to a center-directed velocity vector at the given rotational frequency, so that the low velocity field in the center of the fan is already faded after about 15 cm. Instead, the freely suspended ceiling fans investigated in other studies (Babich et al., 2017; Chen et al., 2018; Gao et al., 2017; Liu, Lipczynska et al., 2018; Raftery et al., 2019; Wang, Zhang et al., 2019) showed a centered eye of low velocities that remained until the floor.

It should be noted that the selected turbulence models are expected to have inaccuracies in the transitions between high and low Reynolds numbers. In the

calculations performed with the Transition SST model, the low-speed region in the center of the jet is longer and extends up to 1 m, but predicts at 1.1 m above the floor (1.4 m underneath the fan) the highest core velocity compared to the other models (figure 2).

Figure 2 shows the axial velocities of both the simulation models and the measurement at a height of 1.1 m (above to the floor). At that section the stationary models show a better agreement with the measurements compared to the transient model. The steady state MRF calculation with the coupled solutions (V2) has the lowest mean absolute error (MAE) (see table 2).

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |v_D - v_S|}{n} \quad (2)$$

(v_D : mean velocity experiment [m/s]; v_S : mean velocity simulation [m/s]; n : count of positions)

But V2 still exceeds the experimental uncertainty (u_D) in the center of the jet (within a diameter of 20 cm) by 0.07 m/s, thus exceeds the measured velocity including the uncertainty by 16 %. The transient solution with the SIMPLE pressure correction (V3) instead exceeds the measured velocity by 41 % in the center of the jet. In the outer zone the MAE of all models is lower or equal u_D (see table 2).

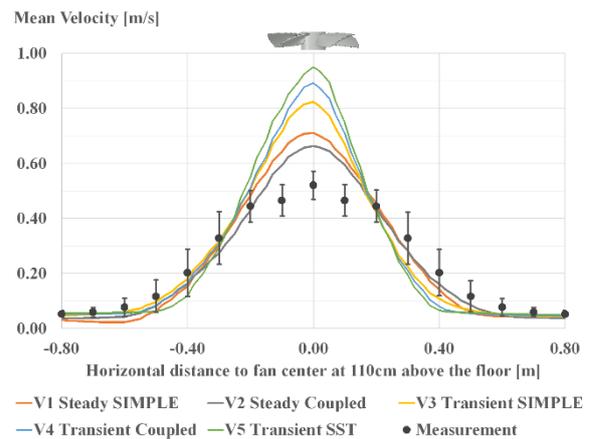


Figure 2: Velocity distribution at 1.1 m above the floor (1.4 m underneath the fan)

However, in the axial section (Figure 3b), an instability during the steady-state simulation and a non-physical velocity distribution can be seen in the immediate vicinity of the fan. Neither the target quantity (velocity at selected reference points) nor the continuity residual ($6e-2$ to $1e-1$) converged during the steady-state MRF calculation. The simulation model went through 20,000 iteration steps. Previous test simulations showed the same behavior even after 140,000 iteration steps.

Only with increasing distance to the fan, there is a better agreement with the expected flow characteristics from Wang, Zhang et al. (2019).

Table 2: Summary Error and Uncertainty [m/s]

	MEAN u_D	MEAN ABSOLUTE ERROR (MAE) SIMULATION				
		V1	V2	V3	V4	V5
whole section -0.8m...0.8m	0.05	0.06	0.05	0.07	0.09	0.10
center -0.1m...0.1m	0.05	0.17	0.13	0.25	0.30	0.35
outer zone 0.2m...0.5m -0.2m...-0.2m	0.08	0.04	0.03	0.05	0.06	0.08

As shown in Peng et al. (2019) the MRF approach is sensitive to size and flow rate of the rotating zone, in order to include the tailing vortexes. In figure 3a, it can be seen, that the non-physical behavior of the MRF approach can be obviated, if the rotating zone is enlarged and fan rotation reduced. But this is only applicable, if no stationary parts exist in the near region of the fan like the housing or panel.

Consequently, it can be assumed that the transient phenomenon of the rotating ceiling fan cannot be adequately represented by means of steady-state calculation if obstacles, such as a panel opening or baffles, are present in the immediate vicinity of the fan. This complies also with results in Franzke et al. (2019).

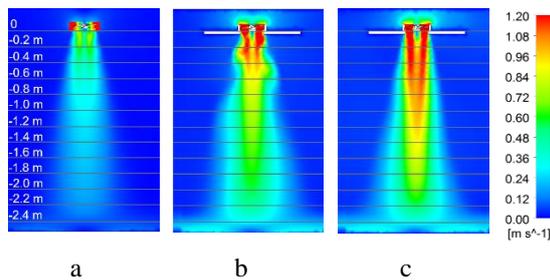


Figure 3: Section mean velocity,
a: freely suspended without housing and panel, with enlarged moving frame and reduced angular velocity (steady, coupled); b: V1, incl. housing and panel (steady, coupled); c: V4, incl. housing and panel (transient, coupled)

Comparing results in figure 2, it can be seen that there are only slight differences in the velocity distribution between the coupled solution and the SIMPLE pressure correction method. In the steady-state calculation, the velocities of the SIMPLE pressure correction method are slightly higher than those of the coupled solution. In the transient calculation this is reversed.

Discussion

In comparison to the measured values, all the considered simulation models predict higher core jet velocities at 1.1 m above the floor. With a measurement uncertainty of 0.05 m/s, the minimum MAE is 0.25 m/s for transient solutions and 0.13 m/s for steady solutions.

Possible reasons could be the model simplification regarding the fan model. E.g. flow resistance and eddy shedding caused by the protection grill has not been taken into account in the simulation model.

Consequently, the applied geometry simplifications could have contributed to the differences between simulation and experiment. So, the overprediction cannot be solely assigned to the transient RBM simulation.

In future studies a model including the protection cover will be investigated. The coupling of the Transition SST model (in the region close to the fan) with the Realizable k - ϵ model (in the free shear flow region) will also be analyzed and additional measurements in different heights will be taken to allow a quantitative evaluation of the flow pattern.

SUMMARY

The stationary simulations show the lowest MAE compared with measurements at 1.1 m above the floor. However, non-physical fluctuations occur in the immediate vicinity of the fan and at the panel opening using the MRF approach with obstacles close to the panel. Therefore, modelling a panel-integrated ceiling fan cannot be carried out with sufficient precision using stationary simulation models. The transient models follow the flow characteristics described in literature the most, but they predict too high velocities in the jet center compared to measurements at 1.1 m above the floor. In the jet center of the transient models, the MAE is five times higher than the measurement uncertainty and exceeds the measured values by at least 41%.

ACKNOWLEDGEMENT

The analysis and data collection were conducted within the project ID: 03ET1563D funded by the German Federal Ministry of Economics and Technology (BMW)

REFERENCES

- Adeeb, E., A. Maqsood, A. Musthaq, & Sohn, C. H. (2016). Parametric Study and Optimization of Ceiling Fan Blades for Improved Aerodynamic Performance. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, Vol 9, 2905–2916.
- ANSYS. (2017). *Fluent Theory Guide 18.2*.
- Arens, E., Turner, S., Zhang, H [Hui], & Paliaga, G. (2009). Moving air for comfort. *ASHRAE Journal UC Berkeley: Center for the Built Environment*, 18–28.
- ASHRAE. (2018). *Ashrae Standard 216P - Methods of Test for Determining Application Data of Overhead Circulator Fans*. ASHRAE.
- ASHRAE Standard 55-2017. *ASHRAE Standard 55 - 2017 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. ASHRAE.

- ASME V&V. (2009). *Standard for verification and validation in computational fluid dynamics and heat transfer: An American national standard* (Reaffirmed 2016). ASME V&V: 20-2009. The American Society of Mechanical Engineers.
- Aynsley, R. (2007). Circulating fans for summer and winter comfort and indoor energy efficiency. *Environment Design Guide*(25), 1–9.
- Babich, F., Cook, M., Loveday, D., Rawal, R., & Shukla, Y. (2017). Transient three-dimensional CFD modelling of ceiling fans. *Building and Environment*, 123, 37–49.
- Bassiouny, R., & Korah, N. S. (2011). Studying the features of air flow induced by a room ceiling-fan. *Energy and Buildings*, 43(8), 1913–1918.
- Brager, G., Paliaga, G., & de Dear, R. (2004). *Operable windows, personal control and occupant comfort* (ASHRAE Transactions Vol 110 Teil 2 - 4695 (RP-1161)).
- Candas, V., Libert, J. P., & Vogt, J. J. (1979). Influence of air velocity and heat acclimation on human skin wettedness and sweating efficiency. *Journal of Applied Physiology*(6), 1194–1200.
- Casseer, D., & Ranasinghe, C. (2019). Assessment of Spallart Almaras Turbulence Model for Numerical Evaluation of Ceiling Fan Performance. *Moratuwa Engineering Research Conference*.
- Chen, W., Liu, S [Shichao], Gao, Y., Zhang, H [Hui], Arens, E., Zhao, L., & Liu, J. (2018). Experimental and numerical investigations of indoor air movement distribution with an office ceiling fan. *Building and Environment*, 130, 14–26.
- de Dear, R., & Brager, G. (1998). *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference* (SF-98-7-3 (4106) (RP-884)).
- DIN EN 16798-1:2015-Draft (2015). *Energy performance of buildings - Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics - Module M1-6; German and English version*. Beuth.
- DIN EN ISO 7730:2006-05. *Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*.
- EN ISO 7726:2001. *Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities; German version*.
- Fanger, P. O. (1970). *Thermal Comfort: Analysis and applications in environmental engineering*. Danish Technical Press.
- Franzke, R., & Sebben, S. (2018). *Validation of Different Fan Modelling Techniques in Computational Fluid Dynamics*. 21st Australasian Fluid Mechanics Conference, Adelaide.
- Franzke, R., Sebben, S., Bark, T., Willeon, E., & Broniewicz, A. (2019). Evaluation of the Multiple Reference Frame Approach for the Modelling of an Axial Cooling Fan. *Energies*, 12(15), 2934.
- Gao, Y., Zhang, H [Hui], Arens, E., Present, E., Ning, B., Zhai, Y., Pantelic, J., Luo, M., Zhao, L., Raftery, P., & Liu, S [Shichao] (2017). Ceiling fan air speeds around desks and office partitions. *Building and Environment*, 124, 412–440.
- Glahn, O. (2016). *Instationäre Raumluftrömung zur Komfortoptimierung – Simulationsstudie zur Bewertung der durch Deckenventilatoren erzeugten Raumluftrömung* [Masterarbeit]. Technische Hochschule Ostwestfalen Lippe, Detmold.
- Huang, L., Ouyang, Q., Zhu, Y., & Jiang, L. (2013). A study about the demand for air movement in warm environment. *Building and Environment*, 61, 27–33.
- DIN EN 15251:2012-12. *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics; German version*. Beuth.
- Kim, J., Bauman, F., Raftery, P., Arens, E., Zhang, H [Hui], Fierro, G., Andersen, M., & Culler, D. (2019). Occupant comfort and behavior: High-resolution data from a 6-month field study of personal comfort systems with 37 real office workers. *Building and Environment*, 148, 348–360.
- Lin, H.-H. (2019). Improvement of Human Thermal Comfort by Optimizing the Airflow Induced by a Ceiling Fan. *Sustainability*, 11(12), 3370.
- Lin, S.-C., & Hsieh, M.-Y. (2014). An Integrated Numerical and Experimental Analysis for Enhancing the Performance of the Hidden Ceiling Fan. *Advances in Mechanical Engineering*. Advance online publication.
- Liu, S [Shuo], Le Yin, Schiavon, S., Ho, W. K., & Ling, K. V. (2018). Coordinate control of air movement for optimal thermal comfort. *Science and Technology for the Built Environment*, 24(8), 886–896.
- Liu, S [Shuo], Lipczynska, A., Schiavon, S., & Arens, E. (2018). Detailed experimental investigation of air speed field induced by ceiling fans. *Building and Environment*, 142, 342–360.
- Luo, M., Cao, B., Ji, W., Ouyang, Q., Lin, B., & Zhu, Y. (2016). The underlying linkage between personal control and thermal comfort: Psychological or physical effects? *Energy and Buildings*, 111, 56–63.
- Melikov, A. K. (2004). Personalized ventilation. *Indoor Air*(14), 157–167.
- Momoi, Y., Sagara, K., Yamanaka, T., & Kotani, H. (2004). *Modeling of Ceiling Fan Based on Velocity*

- Measurement for CFD Simulation of Airflow in Large Room.*
- Nicol, F., & Humphreys, M. A. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings*, 34(6), 563–572.
- Oertel, H., & Prandtl, L. (2017). *Prandtl - Führer durch die Strömungslehre: Grundlagen und Phänomene* (14. Auflage). Springer Reference Technik.
- Pasut, W., Arens, E., Zhang, H [Hui], & Zhai, Y. (2014). Enabling energy-efficient approaches to thermal comfort using room air motion. *Building and Environment*, 79, 13–19.
- Peng, W., Li, G., Geng, J., & Yan, W. (2019). A strategy for the partition of MRF zones in axial fan simulation. *International Journal of Ventilation*, 18(1), 64–78.
- Raftery, P., Fizer, J., Chen, W., He, Y., Zhang, H [Hui], Arens, E., Schiavon, S., & Paliaga, G. (2019). Ceiling fans: Predicting indoor air speeds based on full scale laboratory measurements. *Building and Environment*, 155, 210–223.
- Rissetto, R., Schweiker, M., & Wagner, A. (2020). The effects of occupants' expectations on thermal comfort under summer conditions. *11th Windsor Conference*.
- Rizk, A., El-Deberky, A., & Guirguis, N. M. (2015). Simulation Comparison Between Natural and Hybrid Ventilation by Fans at Nighttime for Severe Hot Climate (Aswan, Egypt). In A. Sayigh (Ed.), *Renewable energy in the service of mankind: Selected topics from the World Renewable Energy Congress WREC 2014* (pp. 609–620). Springer.
- Rohles, F. H., Konz, S. A., & Jones, B. W. (1982). *Ceiling Fans as Extenders of the Summer Comfort Envelope*. D-AC-2752.
- Schiavon, S., & Melikov, A. K. (2008). *Energy saving and improved comfort by increasing air movement*. Center for Environmental Design Research.
- Schiavon, S., & Melikov, A. K. (2009). Introduction of a Cooling-Fan Efficiency Index. *HVAC&R Research*, 15(6), 1121–1144.
- Schwarze, R. (2013). *CFD-Modellierung: Grundlagen und Anwendungen bei Strömungsprozessen*. Springer Vieweg.
- Schweiker, M., & Wagner, A. (2016). The effect of occupancy on perceived control, neutral temperature, and behavioral patterns. *Energy and Buildings*, 117, 246–259.
- Shih, T.-H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z., & Zhu, J. (1995). A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows. *Computers & Fluids*, 24(3), 227–238.
- Tanabe, S.-I., & Kimura, K.-i. (1994). Effects of Air Temperature, Humidity, and Air Movement on Thermal Comfort under Hot and Humid Conditions. In *ASHRAE Transactions* (pp. 953–969). ASHRAE.
- Voss, K., & Voß, T. (2016). Integrated design approach for improving personal summer thermal comfort in existing office buildings with suspended ceilings.
- Voss, K., Voß, T., Otto, J., Schweiker, M., & Rodriguez-Ubinas, E. (2013). *Investigation of ceiling fans for improving summer thermal comfort*. 2nd Central European Symposium on Building Physics. 2nd Central European Symposium on Building Physics, Wien, Österreich.
- Wang, H., Luo, M., Wang, G., & Li, X. (2019). Airflow pattern induced by ceiling fan under different rotation speeds and blowing directions. *Indoor and Built Environment*, 158, 1420326X1989005.
- Wang, H., Zhang, H [Hong], Hu, X., Luo, M., Wang, G., Li, X., & Zhu, Y. (2019). Measurement of airflow pattern induced by ceiling fan with quad-view colour sequence particle streak velocimetry. *Building and Environment*, 152, 122–134.
- Xia, Y. Z., Niu, J. L., Zhao, R. Y., & Burnett, J. (2000). Effects of Turbulent Air on Human Thermal Sensations in a Warm Isothermal Environment. *Indoor Air*(10), 289–296.
- Yakhot, V., Orszag, S. A., Thangam, S., Gatski, T. B., & Speziale, C. G. (1992). Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids a: Fluid Dynamics*, 4(7), 1510–1520.
- Zhai, Y., Arens, E., Elsworth, K., & Zhang, H [Hui] (2017). Selecting air speeds for cooling at sedentary and non-sedentary office activity levels. *Building and Environment*, 122, 247–257.
- Zhang, Y., & Zhao, R. (2007). Effect of local exposure on human responses. *Building and Environment*, 42(7), 2737–2745.
- Zhang, Z., Zhang, W., Zhai, Z. J., & Chen, Q. Y. (2007). Evaluation of Various Turbulence Models in Predicting Airflow and Turbulence in Enclosed Environments by CFD: Part 2—Comparison with Experimental Data from Literature. *HVAC&R Research*, 13(6), 871–886.
- Zhu, S., Srebric, J., Rudnick, S., N., Vincent, R., L., & Nardell, E., A. (2014). Numerical modeling of indoor environment with a ceiling fan and an upper-room ultraviolet germicidal irradiation system. *Building and Environment*(72), 116–124.

SIMULATION-BASED DESIGN OPTIMIZATION OF LARGE-SCALE SEASONAL THERMAL ENERGY STORAGE IN RENEWABLES-BASED DISTRICT HEATING SYSTEMS

A. Dahash¹, F. Ochs¹ and A. Tosatto¹

¹Unit of Energy Efficient Buildings, Department of Structural Engineering and Material Sciences, University of Innsbruck, Innsbruck, Austria

ABSTRACT

A key lever to overcome the challenges in the buildings sector related to today's extensive utilization of fossil fuels is the introduction of renewables-based district heating systems. Thus, large-scale seasonal thermal energy storage (STES) systems found its place favorably in these systems. Yet, STES systems require a thorough planning to avoid the high investment. Consequently, numerical models gain importance as an alternative.

This work develops and validates an equation-based object-oriented tank model. Then, the work examines the influence of TES aspect ratio on performance and stratification. Then, the work inspects the insulation thickness impact on performance and cost.

INTRODUCTION

A key lever to the decarbonization of cities and districts is the systematic transition from the conventional based heating scheme into more sustainable one. Accordingly, the substitution of fossil fuels (e.g. natural gas) with renewable energy resources (e.g. solar energy, waste heat, geothermal energy) is investable and required.

Alongside this transition, district heating (DH) is seen as a key solution to relieve the energy problems in the heating sector, especially the concept of centralized heat production leading to efficient utilization of energy resources. Further, local available renewables are also introduced in this scheme forming renewables-based district heating (R-DH) systems.

To achieve a successful transition, it is of high importance to eliminate shortfalls in the renewables. Among all, the intermittency observed in renewables is the main frontier holding the full transition into renewable-based systems due to the fluctuating patterns (e.g. daily and seasonally) of renewables leading to risks such as the violation of security of supply.

Therefore, large-scale seasonal thermal energy storage (STES) systems are increasingly introduced in R-DH systems in order to capture the excess heat (e.g. industrial waste heat). By this virtue, large-scale TES makes heat available later when and where demand is observed. Yet, it is challenging to integrate STES units

into R-DH system without ensuring the optimal planning layout (e.g. TES type, geometry, operation).

Construction of hot water tanks and pits require large investment; therefore, TES must be properly planned prior to construction to ensure the economic feasibility and efficient operation. Thus, numerical simulations found its place favorably permitting the planners to optimize the design and develop the operation. Hence, it is noteworthy to develop new models to appropriately and accurately simulate STES with feasible computation efforts.

LITERATURE REVIEW

Limits in numerical modeling of large-scale TES

Numerical modeling and simulation of large-scale TES systems unlocks the opportunity as an alternative to real experimental investigations. Yet, it is often held that numerical STES models tend to be costly in terms of simulation time. On a brighter note, numerical models pave the way to examine the impact of any player (e.g. dimensions, operation characteristic) on the STES performance without any actual economic cost related to construction.

To capture the insights, Chang et al. (Chang et al., 2017) developed and validated a CFD model perfectly tailored to investigate the impact of some characteristic parameters on pit TES efficiency. It was concluded that the efficiency drastically decreases as the slope angle becomes smaller. Additionally, a degradation in stratification degree was detected, which was attributable to the decrease in the PTES depth and, thus, less thermal efficiency.

CFD simulations certainly require enormous computation efforts and, currently, this is considered impractical. Thus, CFD simulations are ideally suited for specific tasks or short-term operations. To tackle this challenge, assumptions are made for a number of inputs (e.g. material properties) in simulations. Thereby, a positive notable reduction in the computation efforts is seen leading to the so-called "coarse models". In this context, a dynamic finite-element model was developed in Matlab/Simulink platform (Ochs, 2014). The model captures various TES shapes limited to circular cross-sections (i.e. cylinder, cone) for underground hot water TES. Then,

the model was further coupled to a finite difference model for the ground.

To reduce the models' complexity, (Sorknæs, 2018) developed a simulation method to simulate a pit TES coupled with a heat pump in a DH system. The simulation results were compared against measured data from Dronninglund pit TES for the year 2015. The simulated thermal losses were around 1741 MWh, whereas the measured thermal losses were around 1275 MWh. This discrepancy (approx. 35 %) highlights the inaccuracy of this method, which might deliver misleading conclusions during STES planning phase.

In coarse models, the “notable” reduction has a cost that often results into a shortcoming in the depiction of thermal hydraulic behavior in STES. Thus, coarse models do not accurately account for thermal losses, especially when the case comes to a more complicated modeling scheme (e.g. presence of groundwater flow).

Challenges in planning and construction of large-scale TES

The planning and construction of large-scale STES are often seen challenging in both technical and economic aspects (Dahash et al., 2019). This arises from the fact that such systems require great volumes to fulfill the seasonal tasks and, therefore, large space availability is needed.

Throughout the planning phase, some interesting questions start to arise in context of the construction type (e.g. partially or full buried) and geometry (e.g. tank, truncated cone or pyramid stump) and others while planning the optimal STES for a selected R-DH.

A substantial attention was paid to underline the players influencing the planning of a STES in (Dahash et al., 2019). The work emphasized that for a proper selection of a large-scale STES (design, geometry and construction type), a wide variety of inputs (hydro-geological factors, system characteristics, thermal losses, investment cost, etc.) are coherently evaluated to comprehend the impacts. Thereby, the decision-makers are informed which compromise between the technical performance and the economic investment is the optimal.

By means of numerical simulations, (Ochs et al., 2019) conducted a techno-economic analysis for large-scale TES. The study pointed out that a TES with 100 000 m³ installed in LT-DH systems is more promising on both economic and technical aspects compared to its corresponding installed in HT-DH systems.

Contribution of this work

The authors present a numerical approach for modeling large-scale TES. Next, the model is validated against a valid finite-element, which is validated considering measured data from Dronninglund PTES in Denmark. Then, the work investigates the influence of tank shape on thermal performance and stratification. Next, the work techno-

economically examines the influence of insulation thickness concerning tank performance and costs.

METHODOLOGY

Development of hot-water tank TES

The tank is developed using the partial stratified tank from the Modelica Buildings library (Wetter et al., 2013). The model is divided into a number (n) of segments in which each segment has a uniform temperature (T_i). Besides, the developed model allows more than a single incoming/outgoing stream of water. Therefore, multiple inlet and outlets are allowable.

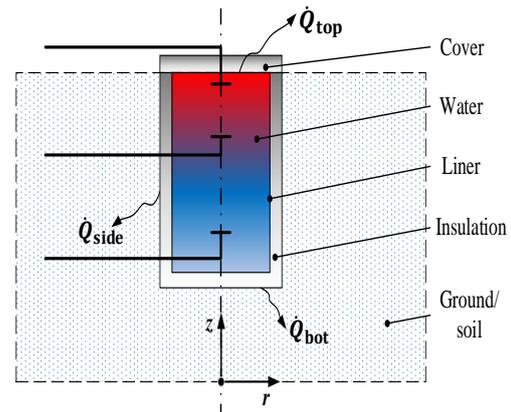


Figure 1: A 2-D representation of buried tank with 3 injection/extraction diffusers.

In the partial tank model, the major modification takes place in the enhanced thermal conductivity. Throughout TES storage and idle modes, a buoyancy-driven heat flow is dominating. This arises since water has a temperature-dependent density. Hence, a natural convection is consequently induced by buoyancy resulting into a water recirculation between the hot and cold regions close to the TES boundaries. Due to the high losses through the top of TES, a temperature drop might be observed at the very top of the storage near to upper surface area. This drop might form an undesired phenomenon known as “inverse thermocline” in the simulated stratification profile.

In order to tackle this shortcoming, the water heat conductive term is substituted with another term to enhance the thermal conductivity of water and, consequently, to eliminate inverse thermocline (Dahash et al., 2019). Accordingly:

$$A_i \nabla \cdot (\lambda_w \nabla T_i) = \begin{cases} A_i \nabla \cdot (\lambda_w \nabla T_i), & \dot{V}_w \neq 0 \\ A_i \nabla \cdot (\lambda_{w,enh} \nabla T_i), & \dot{V}_w = 0 \text{ and } \frac{\partial T_i}{\partial z_i} < 0 \end{cases} \quad (1)$$

Where the enhanced thermal conductivity is theoretically originated from Nusselt and Rayleigh numbers and modified following the given application (large-scale TES). Thus, to account for the influence of natural convection driven by buoyancy:

$$\lambda_{w,enh} = \lambda_w \cdot Nu \quad (2)$$

Where Nusselt number requires two constants C and k that are usually experimentally determined. Accordingly, it can be stated:

$$Nu = C \cdot Ra^k \quad (3)$$

$$Ra = \frac{g\beta \cdot \Delta T \cdot z^3}{\nu\alpha} \quad (4)$$

g stands for the gravitational acceleration. Whereas β , ν and α represent the thermal expansion, kinematic viscosity and thermal diffusivity of water, respectively. Further, ΔT accounts for the temperature difference between the segments along the characteristic length (z) due to the difference in the vertical thermal conductivity imposed by natural convection. Consequently, the enhanced thermal conductivity obeys the following function:

$$\lambda_{w,enh} = C \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^k \quad (5)$$

Where C denotes a constant that brings different dimensional parameters (e.g. volume, height) together with thermo-physical properties (e.g. density, specific heat capacity, thermal expansion coefficient). Whereas the exponent k is usually experimentally determined and accordingly tuned depending on the application, storage medium and geometry (e.g. cylindrical or pit); however, $k = 0.5$ was confirmed to be the most applicable value to the investigated case.

Development of ground/soil model

This model is developed to predict the thermal interaction between the buried tank and the surrounding soil with a focus on long-term operations. It is established in a finite-difference fashion with a discretization in both radial and axial directions, so the ground's axial and radial temperatures are depicted. Consequently, the model consists of different nodes in both directions forming an adjustable mesh. Figure 2 illustrates the temperature field with the nodal network in axial and radial directions.

The grid is divided into (n_{rad}) and (n_{ax}) nodes in radial and axial directions, respectively. Each cell has two radii; one is inner and the other is outer. As thermal properties, the model involves the thermal diffusivity of the soil to fulfill the heat equation as follows:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_g(r, z, t)}{\partial t} &= \alpha \frac{\partial^2 T_g(r, z, t)}{\partial r^2} \\ &+ \alpha \frac{1}{r} \frac{\partial T_g(r, z, t)}{\partial r} \\ &+ \alpha \frac{\partial^2 T_g(r, z, t)}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (6)$$

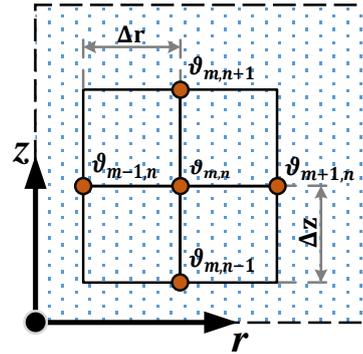


Figure 2: Nodal network for the soil model.

Operation scenarios and boundary conditions

This work aims to develop buried tank models that are reliable and computationally fast enough to give insights into the STES planning. Thus, it is advantageous to eliminate system simulations (e.g. solar thermal collectors, heat pumps pipelines, customers) in order to avoid costly simulations in terms of simulation time and computation efforts. Still, DH operation profiles (i.e. temperature and flowrates) are crucial for the TES operation (i.e. charging/discharging modes). Thus, a simplified DH temperature profile is introduced in the model. The DH supply temperature is set to 90 °C and the return temperature is given as 60 °C. Figure 3 and Figure 4 show the simplified periodic operating conditions for a TES.

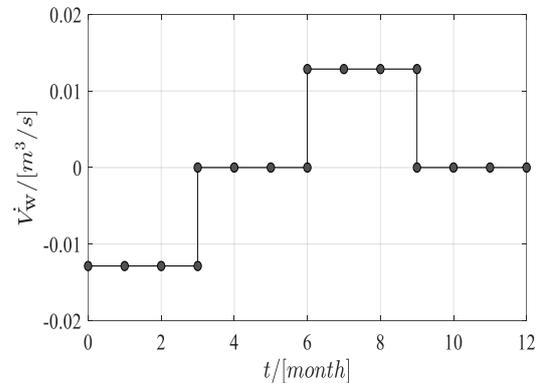


Figure 3: Water volumetric flowrate as a periodic function of the time for a tank with a volume of 100 000 m³.

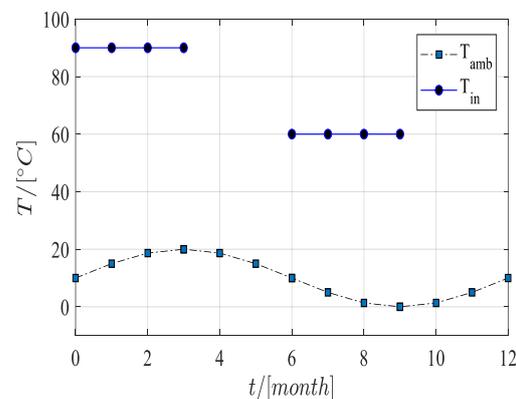


Figure 4: Flow temperature as a periodic function of the time and ambient temperature as a sinus function with an average of 10°C.

Performance indicators

In this work, TES energy capacity efficiency is used to indicate the tank thermal performance and it is given as below:

$$\eta_{\text{TES}} = 1 - \frac{Q_{\text{loss}}}{Q_{\text{TES}}} \quad (7)$$

The importance of such a definition is the correlation between the annual thermal losses to the maximum theoretical storage capacity. In this regard, the storage losses depend on the operation scenario and boundary conditions and are determined by dynamic simulations. The storage capacity is a function of the TES volume and the maximum and minimum temperature:

$$Q_{\text{TES}} = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) \quad (8)$$

Thermal stratification is a central element in TES performance as it influences the water temperatures inside the tank. Stratification depends on the tanks shape and aspect ratios. In this context, it is crucial to examine the influence of different aspect ratios on the stratification quality and, thus, two stratification measures are used in this work. One measure is the stratification number, $Str(t)$, and obeys the following:

$$Str(t) = \frac{\overline{(\partial T / \partial z)}_t}{\overline{(\partial T / \partial z)}_{\text{max}}} \quad (9)$$

Where:

$$\overline{(\partial T / \partial z)}_t = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^{n-1} \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta z} \right] \quad (10)$$

$$\overline{(\partial T / \partial z)}_{\text{max}} = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{in}}}{(n-1) \cdot \Delta z} \quad (11)$$

T_{max} represents the maximum temperature realized in the entire TES operation, whilst the minimum temperature is given by the inlet temperature. Further, Δz expresses the height between the adjacent segments at which temperatures are measured.

Whereas the second measure is the stratification efficiency, which is based on the MIX number shown below:

$$\eta_{\text{Str}} = 1 - \text{MIX} \quad (12)$$

$$\text{MIX} = \frac{M_E^{\text{stratified}} - M_E^{\text{exp}}}{M_E^{\text{stratified}} - M_E^{\text{fully-mixed}}} \quad (13)$$

Thus:

$$\eta_{\text{Str}} = \frac{M_E^{\text{exp}} - M_E^{\text{fully-mixed}}}{M_E^{\text{stratified}} - M_E^{\text{fully-mixed}}} \quad (14)$$

This measure defines the stratification quality as it compares the moment of energy for the investigated tank compared to the perfectly-stratified and fully-mixed tanks. Accordingly, perfectly-stratified TES is characterized by the largest value for M_E , whereas fully-mixed ones have the smallest value of M_E and an

experimentally TES system has a value in between. the moment of energy obeys the following expression:

$$M_E = \sum_{i=1}^n z_i \cdot Q_i = \sum_{i=1}^n z_i \cdot (\rho V_i) \cdot c_p \cdot T_i \quad (15)$$

More information about these measures can be found in (Dahash et al., 2019) and (Haller et al., 2009).

In order to carry out a techno-economic analysis, it is important to use a measure that can reflect the influence of each insulation thickness on both performance and capital cost. Thus, this work suggests the levelized cost of storage (LCOS) as follows:

$$\text{LCOS} = \frac{C_{\text{fix}} + C_{\text{O\&M}}}{Q_{\text{dis}}} \quad (16)$$

C_{fix} and $C_{\text{O\&M}}$ represent the annual fixed payments and operation maintenance costs, respectively. The annual fixed costs are computed via the tank total investment cost and the annuity factor, whereas the operation costs (e.g. maintenance) is estimated as 10 % of the annual fixed payments. Thus:

$$C_{\text{fix}} = C_{\text{inv}} \cdot \text{ANF}_{n,i} \quad (17)$$

$$C_{\text{op}} = 10 \% \cdot C_{\text{fix}} \quad (18)$$

$$\text{ANF}_{n,i} = \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1} \quad (19)$$

The capital cost is estimated using the cost provided in (Ochs et al., 2019) for the different construction types and geometries. Yet, this work narrows the investigation down to the fully-buried tank with a volume of 100 000 m³ equipped with a floating cover as reported in Table 1. Assuming a service lifetime of $n = 50$ years and a discount rate of $i = 3\%$, then, $\text{ANF} = 3.9\%$.

Table 1: Specific costs for the tank construction (simplified)

Contribution	(Specific) Costs	Remark
Excavation	20 €/m ³	Partly wet
Diaphragm wall	550 €/m ²	50 m deep
Cut-off wall	50 €/m ²	For groundwater in 5 m distance
Bottom insulation	100 €/m ³	Pressure resistant
Wall	375 €/m ³	Insulation cost
Insulation	100 €/m ²	Installation
Liner	150 €/m ²	Stainless steel
Floating cover	200 €/m ²	With 50 cm insulation
Plant construction	40,000 €	Independent of construction
Site facilities	50,000 €	Fixed

RESULTS AND DISCUSSION

Validation of Modelica TES model

To gain trust in the developed tank model, it is crucial to compare the model outcomes against measured data. Herein, the tank model developed in Modelica is

cross-validated against a finite-element model developed in COMSOL Multiphysics, which was already validated against Dronninglund pit TES in Denmark (Dahash et al., 2020). Subsequently, the COMSOL model is the benchmark in this study. It is worthy to mention that COMSOL model considers the heat transfer in the solid domain (i.e. soil) as physics-based, whereas the fluid domain (i.e. TES) is developed as equation-based to simulate the multi-physical aspects (heat transfer, fluid flow) in order to avoid lengthy CFD-simulations for such large-scale TES (Dahash et al., 2020). The proposed buoyancy model is originated from numerical and experimental investigations and prior reports.

For the validation, a tank with a volume of 2 000 000 m³ and a height of 50 m is used as the validation case study. Moreover, it is presumed the tank has a lid with $U_{top} = 0.15 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ and insulation for the bottom and mantle; $U_{side} = U_{bot} = 0.3 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$.

Figure demonstrates a notable matching for the top, middle and bottom in the temperature profiles between

both simulated tanks in the different tools. Yet, not only shall the temperature profiles be matching but also the thermal losses. Therefore, Table 2 reports the breakdown of thermal losses for and provides the relative error in the total thermal losses over the five years of investigation.

Simulation-based optimization

To run the simulations, Figure 4 is used to represent the temperature profile in the R-DH system. Accordingly, a series of simulations is presumed to start on May 1st of each simulation year during which the charging phase starts and, then, over a course of three months the storage is injected with renewable-based heat carried by hot water. This phase is followed by a 3-months storage phase. Next, the discharging phase takes place followed by 3 months of idle phase. The simulation timespan is set up for a 10-years operation permitting the STES system to reach its operating capacity and to allow the ground to pass the preheating. A single-day simulation time step is utilized in the numerical model. However, shorter time steps did not provide remarkable deviation in results.

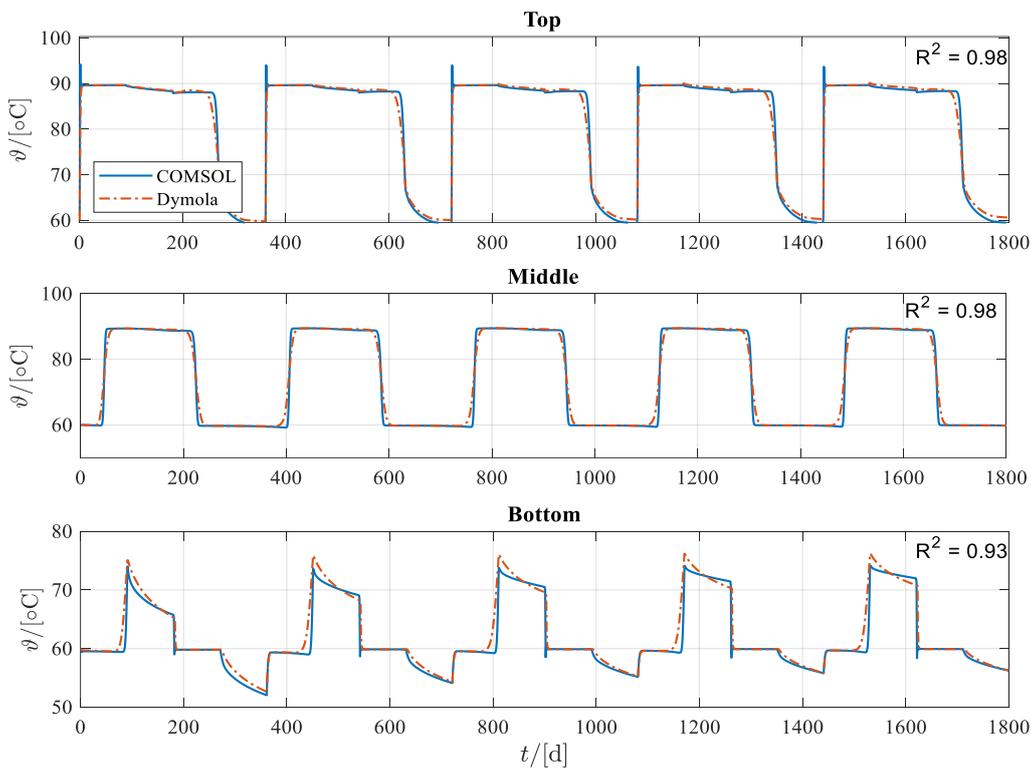


Figure 5: Temperature development at the 5th year for the cross-validation between COMSOL and Dymola

Table 2: Breakdown of the annual thermal losses for the cross-validation of the tank model.

Year	Dymola				COMSOL			
	Q_{top}	Q_{side}	Q_{bot}	Q_{loss}	Q_{top}	Q_{side}	Q_{bot}	Q_{loss}
	[MWh]				[MWh]			
1	3432	2785	2149	8365	3428	2785	2148	8361
2	3364	2037	1550	6952	3364	2035	1549	6948
3	3368	1815	1272	6455	3366	1814	1271	6451
4	3368	1702	1116	6186	3368	1699	1115	6181
5	3385	1631	1016	6032	3384	1628	1013	6026

Influence of tank shape on TES performance

In order to demonstrate the role of tank shape when planning a large-scale TES, it is crucial to highlight the role of aspect ratio, which is a quotient of TES height to TES diameter. Thus, a 100 000 m³ tank is simulated with $U_{\text{top}} = 0.15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ and $U_{\text{side}} = U_{\text{bot}} = 0.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Figure 6 documents the total thermal losses for a variety of tank shapes as the aspect ratio increases. It inevitably demonstrates that the thermal losses decline as the surface area-to-volume ratio (SA/V) decreases. This is also recognized as the aspect ratio reaches a value of (AR = 1). Then, the losses start to increase as a consequence to the increase in SA/V, which is attributable to the role played by the tank's surface area.

Accordingly, the SA/V is an important consideration in a large-scale seasonal TES since it has a direct impact on the external losses from the TES. Therefore, it is recommended to maintain a small SA/V ratio. Besides, the most promising aspect ratio is (AR = 1) since it effectively reduces the total thermal losses.

Together with space availability, it is crucial to pinpoint that some hydro- geological conditions emerge as barriers from realizing the aimed aspect ratio and, subsequently, unfavorable aspect ratios were applied for several large-scale TES worldwide.

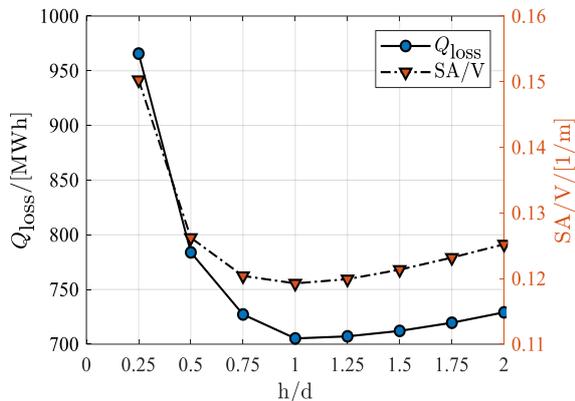


Figure 6: Thermal losses at the end of the 5th year for a tank with 100 000 m³.

Influence of tank shape on thermal stratification

A key player for a good stratification is the tank shape because an improper TES geometry might enhance the mixing leading to stratification decay and, thus, exergetic losses. This section elaborates the tank shape influence on the stratification quality. Given some economic limits, the maximum feasible depth for a buried tank is limited to 50 m; consequently, this excludes shapes with (AR > 1) in this investigation since the excavation below 50 m is not feasible.

Figure reveals the development of the stratification number and stratification efficiency for a 100 000 m³ tank with 4 aspect ratios. This evaluation is applied

over the 5th operational year. In this context, 4 TES operative phases are clearly recognized that are: charging, standby, discharging and idle, which correspond to A, B, C and D, respectively.

Figure depicts that TES stratification quality tends to decrease over the 1st half of charging phase and, then, it increases indicating a good stratification quality. This phenomenon can be justified that during the 1st half more than half of TES volume is filled with water at 60°C (initial temperature) and, simultaneously, 90°C hot water is injected from the top diffuser. Whereas in the 2nd half, more than half of TES volume is filled with hot water and, meanwhile, charging carries on.

In the region (B), TES undergoes a standby mode in which no incoming/outgoing flowrates and, therefore, stratification maintains a good quality with a slight decay attributed to the thermal losses from TES envelope. Besides, TES experiences a buoyancy-driven heat flow over the standby mode and, subsequently, mixing is enhanced. Over this period, TES with aspect ratio of (AR = 1) exhibits a notable stratification quality compared to other aspect ratios.

Whereas throughout the region (C), TES discharges the stored energy to R-DH network and is injected with 60°C water from the return line. Therefore, the stratification quality suddenly experiences a decline due to the extraction of hot water from the upper diffuser and, simultaneously, injection of water with water at 60°C from the bottom diffuser. Then, the stratification gradually builds up and improves leading to better quality by the end of this phase.

Period (D) is similar to period (B) whereby conductive heat transfer is dominating with no incoming and outgoing flowrates. Therefore, this period is characterized with initial mixing that is promptly counterbalanced by equation (5) in order to avoid misleading results by inverse thermocline. Yet, the good level of stratification is also attributed to thermal losses that bring the tank to lower temperatures than that of DH return temperature.

Having considered stratification measures, a tank shape with (AR = 1) exhibits the premium stratification quality among other options. It also has less surface area and, consequently, less thermal losses. Thereby, this tank has higher quality of energy delivered to DH in terms of temperature.

Techno-economic analysis for insulation thickness

Herein, the insulation thickness investigated is subjected to the following, $X_{\text{ins}} = [0 \ 10 \ 25 \ 50 \ 75 \ 100 \ 120 \ 160 \ 200 \ 220 \ 240 \ 260]$ mm. The increase in the insulation thickness reduces the annual thermal losses leading to ultimate increase in the performance. Figure 8 depicts an increase of around 11 % in the tank performance if the option with 260 mm insulation thickness is chosen over the case with no insulation.

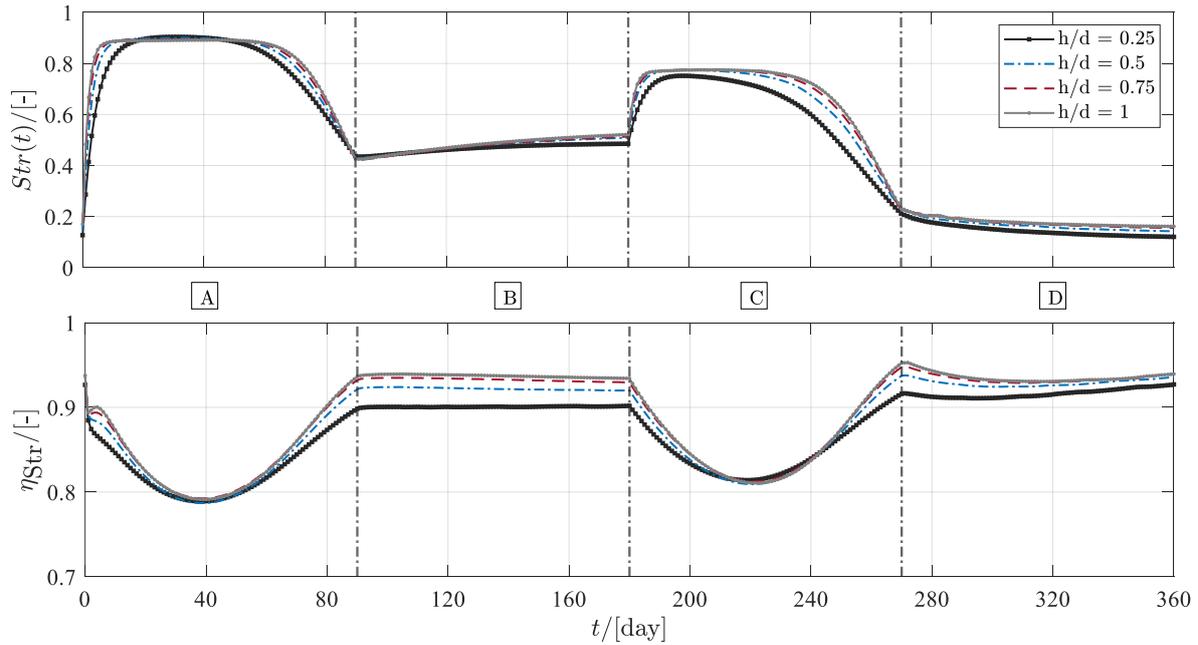


Figure 7: Stratification number and stratification efficiency development over the 5th year for a 100 000 m³ buried tank.

Inevitably, this increase has an impact on the energy delivered by the tank and, thereby, the yearly amount of discharged heat to the heating grid also increases to approx. 300 MWh as shown in Figure 9. This increase accounts for around 11 %.

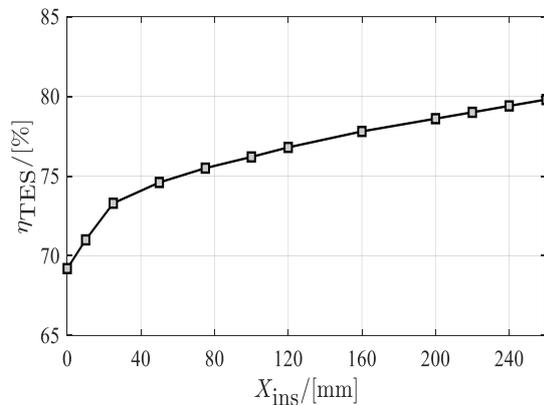


Figure 8: Tank efficiency at the end of the 5th year for different insulation thicknesses.

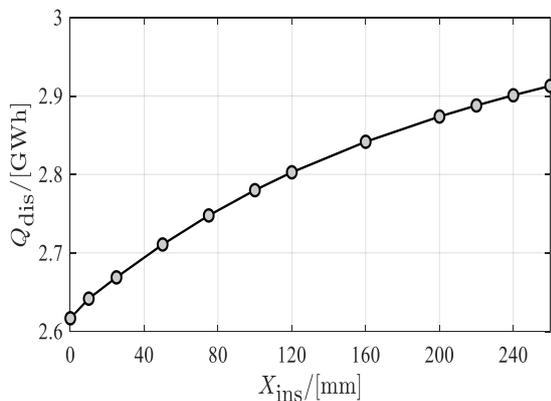


Figure 9: Tank discharged heat at the end of the 5th year for different insulation thicknesses.

Concerning the influence of this increase on the LCOS, Figure 10 illustrates the trend for the different thickness scenarios. It is remarkably seen that despite the increase in the yearly amount of heat discharged, there is a notable increase in the LCOS and, accordingly, this draws attention that there is a relative increase also in the specific capital cost.

Figure 10 depicts that approx. 10 €/MWh is added when insulation with 260 mm is installed for the side wall and the bottom and the corresponding profit can be computed by assuming a heat selling price of 55 €/MWh with an additional yearly amount of 300 MWh discharged energy, then, an increase of 16500 €/a, which accounts for additional 11 % more profit compared to the non-insulated case. However, this also triggers the capital cost to increase by approx. 19 % if the well-insulated case is chosen and this corresponds to approx. 1,622,010 € if the well-insulated case is chosen over the uninsulated one.

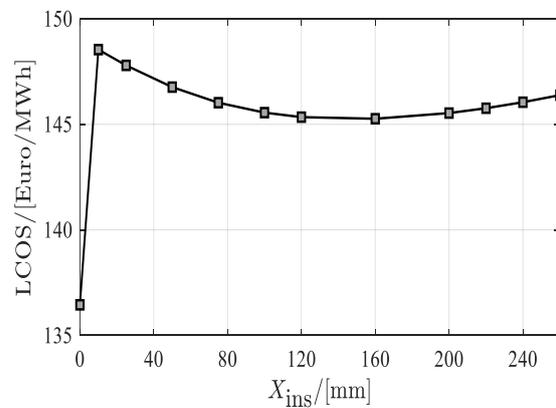


Figure 10: Tank LCOS for different insulation thicknesses.

Yet, it is important to mention that these results are applicable only for the case investigated under the given boundary conditions. In other words, a sensitivity analysis for each single parameter is necessary in order to evaluate the parameter's influence on the techno-economic analysis leading to well-established planning guidelines.

CONCLUSION

As the ultimate goal strives for a 100 % renewable heat supply in the DH domain, it is crucial to equip those systems with large-scale TES volumes. Yet, it is important to plan these systems properly and feasibly in order to ensure the perfectly tailored cost-effective option for each given R-DH. Otherwise, the TES performance would be below expectations with enormous capital expenditure. Therefore, numerical simulations emerge as an alternative to real-world experiments. Thereby, it notably reduces the costs with drastic increase in the in-depth knowledge leading to proper planning of large-scale TES.

This work investigated the numerical modeling of large-scale TES in an equation-based object-oriented programming language (i.e. Modelica). Later, the model was cross-validated against a valid numerical model that was validated against measured data from an existing real-world large-scale TES. The results revealed a remarkable agreement between the models.

Then, simulation-based optimizations ran to examine the impact of tank shape on tank thermal performance and thermal stratification. The study depicted that tanks with (AR = 1) tend to have the optimal performance and stratification compared to other aspect ratios. Whereas the aspect ratio (AR = 0.25) delivered the worst stratification and this was attributed to the tank height and the large cover area leading to higher amount of annual thermal losses.

To techno-economically evaluate the influence of insulation thickness on STES performance, the LCOS was calculated for the list of thicknesses chosen in this work. The highest possible thickness of 260 mm depicted a notable increase in STES performance and, accordingly, an increase in the yearly discharged heat. However, this thickness led to a significant increase in the capital cost.

It is important to highlight the model developed has a downside, which is the limitation to tank shapes. In other words, the model is not capable to represent sloped-walls TES (e.g. truncated cone) and this challenge will be tackled in future work.

ACKNOWLEDGEMENT

This project is financed by the Austrian "Klima- und Energiefonds" and performed in the frame of the program "Energieforschung". It is part of the Austrian flagship research project "Giga-Scale Thermal Energy Storage for Renewable Districts" (giga_TES, Project Nr.: 860949). Therefore, the authors wish to acknowledge the financial support for this work.

REFERENCES

- Chang et al. (2017). Influences of the key characteristic parameters on the thermal performance of a water pit seasonal thermal storage. *Energy Procedia*, 142, 495-500. doi:10.1016/j.egypro.2017.12.077
- Dahash et al. (2019). Advances in seasonal thermal energy storage for solar district heating applications: A critical review on large-scale hot-water tank and pit thermal energy storage systems. *Applied Energy*, 239, 296-315. doi:10.1016/j.apenergy.2019.01.189.
- Dahash et al. (2019). Numerical analysis and evaluation of large-scale hot water tanks and pits in district heating systems. *Building Simulation 2019 Conference*, 29, pp. 1692-1699. Rome (Italy), 02-04 September 2019. doi:doi.org/10.26868/25222708.2019.210566
- Dahash et al. (2020). Toward Efficient Numerical Modeling and Analysis of Large-Scale Thermal Energy Storage for Renewable District Heating Systems (Submitted manuscript). *Applied Energy*.
- Haller et al. (2009). Methods to determine stratification efficiency of thermal energy storage processes – Review and theoretical comparison. *Solar Energy*, 83(10), 1847-1860. doi:10.1016/j.solener.2009.06.019.
- Ochs et al. (2019). Techno-economic planning and construction of cost-effective large-scale hot water thermal energy storage for Renewable District heating systems. *Renewable Energy*, 150, 1165-1177. doi:doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.017.
- Ochs, F. (2014). Large-Scale Thermal Energy Stores in District Heating Systems – Simulation Based Optimization. *Proceedings of EuroSun 2014: International Conference on Solar Energy and Buildings*. Aix-les-Bains (France), 16-19 September 2014.
- Sorknæs, P. (2018). Simulation method for a pit seasonal thermal energy storage system with a heat pump in a district heating system. *Energy*, 152, 533-538. doi:doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.152.
- Wetter et al. (2013). Modelica Buildings library. *Journal of Building Performance Simulation*, 7(4), 253-270. doi:doi.org/10.1080/19401493.2013.765506

INVESTIGATION OF PHOTOVOLTAIC-THERMAL (PVT) COLLECTOR FOR DIRECT COUPLING WITH HEAT PUMPS: HARDWARE IN THE LOOP (HiL) AND TRNSYS SIMULATIONS

B. Chhugani¹, M. Kirchner¹, M. Littwin¹, C. Lampe¹, F. Giovannetti¹ and P. Pärtsch¹

¹Institute for Solar Energy Research Hamelin (ISFH),
31860 Emmerthal, Germany

ABSTRACT

The presented research work is about the investigation of an uncovered, liquid-based PVT collector, which serves as a sole heat source for a heat pump system. The PV module is thermally coupled with a fin-tube heat exchanger, which enables to use energy from the sun and ambient air optimally; hence, the collector works as a good environmental heat exchanger. Within the scope of the project, a PVT Field with a heat pump has been installed and tested dynamically under hardware-in-the-loop test environment for the energy supply of a single-family house. The result shows that the performance-factor with the system can go above 3.3 during the considered winter season.

INTRODUCTION

In PVT systems, the thermal collector rear side of a PV panel gives an additional opportunity to utilise the excessive heat for low-temperature heating application and therefore with the same PV area, higher solar energy could be harvested. Standard PVT collectors can provide both electrical and thermal energy in a ratio of about 1:4 (Helbig et al., 2018). This suggests that PVT collectors could be an ideal source for a heat pump, but the matching of demand and supply is challenging to estimate. However, the offset between supply and demand during the day can easily be compensated by a thermal storage tank on the sink side or source side of the heat pump or both; but it is still more challenging to reconcile the seasonal heat generation effect from PVT collectors. One of the solutions can be a combination of PVT with ground heat exchanger or geothermal probe on the source side of the heat pump (Bertram et al., 2012; Zenhäusern et al., 2017) but all these solutions are costly. An alternative option to replace the additional source side storage is the direct coupling of PVT to heat pump, and for that, intensive investigations have been carried out in previous works (O'Dell et al., 1984; Ito et al., 1999; and Bridgeman et al., 2008), however, in all investigations, the collector design optimisation is not addressed. An ideal PVT collector for a heat pump should extract the energy from the sun and ambient air optimally, and it should work as a good environmental heat exchanger, which can become even more reliable than air source heat pumps. Hence, in the present research work, a novel PVT collector combination of

PV with backside brine-to-air fin heat exchanger as a sole heat source of a heat pump has been investigated with Hardware in the Loop (HiL) test environment. HiL is an approach to simulate and to test complex real thermal systems dynamically under real-time varying environmental constraints. A limited number of publications are available about HiL for the heating sector in buildings. One of the investigations was carried out at TU Munich in HiL testbed for heating systems with ground source heat pump, and the researcher presented the energy consumption and the deviation of the testbed operation with and without HiL. The result showed a deviation of 2% for heat generation and 5% electricity consumption of the heat pump between with and without HiL (El-Baz et al., 2018).

The present paper focuses on an investigation PVT to heat pump system for the energy supply of a single-family house with HiL tests. The energetic and dynamic analysis of these tests are discussed, and the performance indicators of the heating supply system under real weather constraints are determined.

METHODOLOGY

Hardware in the Loop testbed

Figure 1 shows the simplified hydraulic scheme of HiL setup at ISFH. The energy source (PVT collectors), the heat pump (HP) and the thermal buffer storage have been operated in real-time as hardware. In contrast, energy sinks for domestic hot water (DHW) and space heating (SH) demand of the system have been dynamically simulated and emulated. The simulation of the space heating (SH) demand of a single-family house has been carried out using TRNSYS; the emulation has been executed using controlled heating/cooling circuits. LabVIEW program has been used to control tap cascades and emulates the DHW tap profiles. The interface between TRNSYS and emulators was developed using LabVIEW as a specific TRNSYS type. Consequently, to evaluate the PVT Field, metrological equipment has been installed at ISFH location (testbed) to measure wind speed, ambient air temperature, sky temperature, hemispherical radiation on collector plane and the fluid temperatures at the collector panel inlet and outlet.

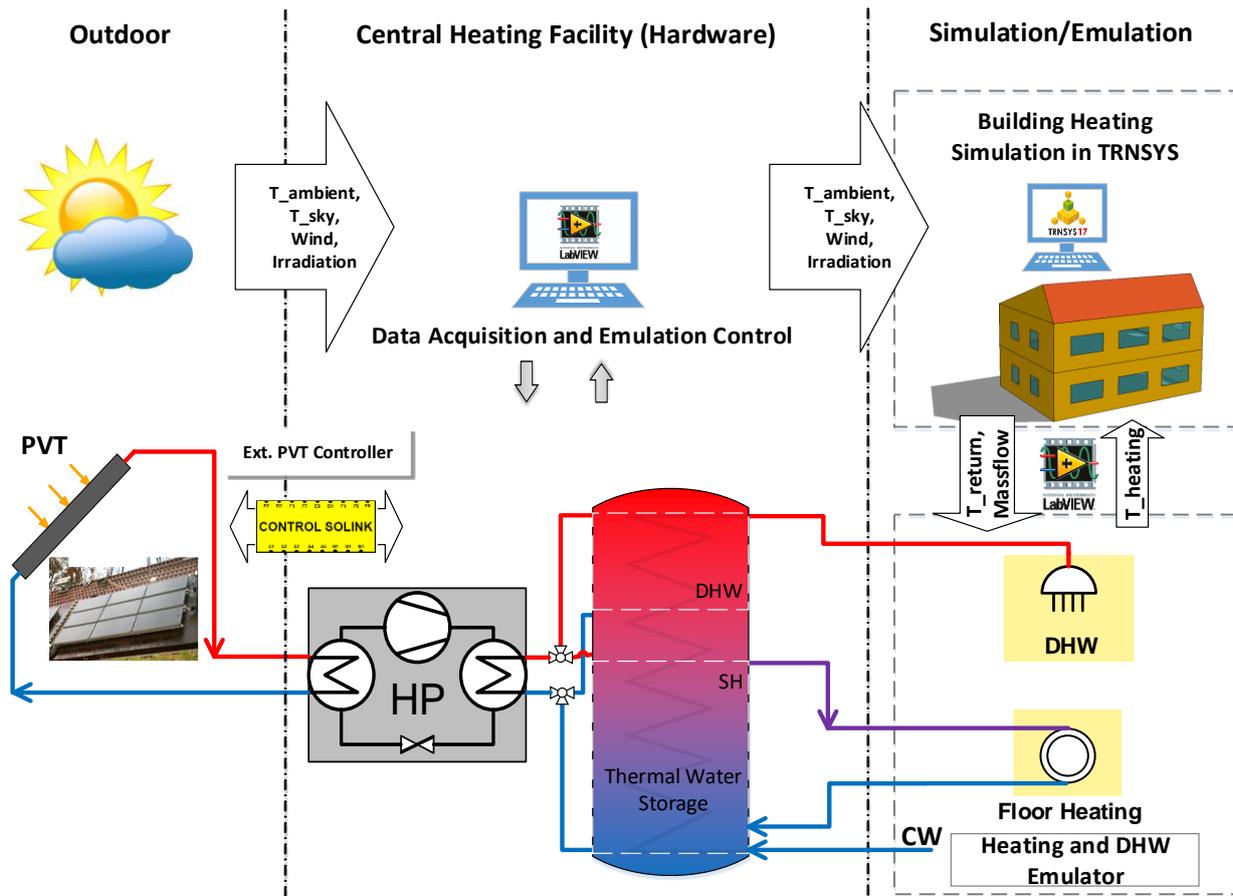


Figure 1: Simplified Hardware in the Loop (HiL) Concept at ISFH

Figure 1 shows the dynamic building simulation in TRNSYS uses the real-time measured weather data, which includes solar radiation on different surfaces of the building, sky temperature, wind speed, ambient temperature. On the other hand, for the dynamic heating simulation, the heating flow temperature is conveyed to TRNSYS, which returns the mass flow and space heating return temperature back to the emulator.

PVT collector

The PVT collector, which is used in the investigation, has been developed by the company Consolar Solare Energiesysteme GmbH, KIT and Triple Solar B.V. (Leibfried et al., 2017) and is shown in Figure 2.

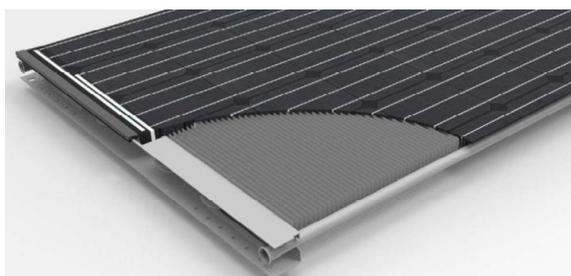


Figure 2: Sectional view of the PVT collector: the fin tube heat exchanger on the backside of the surface (Leibfried 2018)

The collector is thermally coupled with a fin tube heat exchanger, and this geometry strongly improves the performance because the fin surface is 10 times larger than the PV module area and works as an ambient heat exchanger. Hence, the surface leads to a better thermal output even in times of low irradiation. Therefore, this PVT-heat pump offers a promising alternative to conventional geothermal sources of brine-water heat pumps and can be an alternative solution to an air-water heat pump.

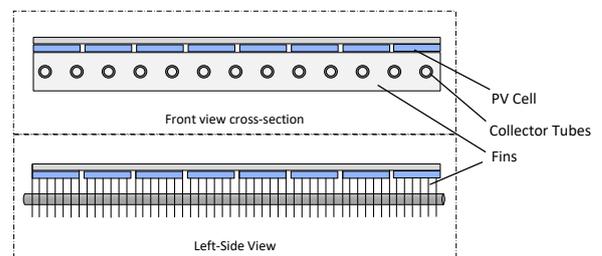


Figure 3: Schematic diagram of PVT Collector

In this PVT collector, condensation heat gains, as well as heat gains through the phase change to frost on fins surfaces improve the thermal output, which makes it particularly suitable for the low-temperature heating application. Figure 3 shows a schematic of the PVT; the heat exchanger is connected to the PV module with

an adhesive layer ensuring an effective transfer of the absorbed solar energy into the fluid. The thermal efficiency of the collector was determined by means of outdoor measurements at IGTE (University of Stuttgart) according to the Standard ISO 9806 (2017) as part of a Solar Keymark certification as well as additionally investigated at the ISFH and extensively presented in (Lampe et al. 2019), and thermal collector parameter is shown in Table 1. Each module has a maximum output voltage and current of 37.6 V and 9.05 A respectively, corresponding to the maximum power output of 340 Wp under Standard Test Conditions. Within the scope of the project, nine PVT Modules with a total area of approx. 18 m² have been installed on the south-facing test roof of ISFH and monitored.

Table 1: Thermal Collector Parameter of PVT

THERMAL COLLECTOR PARAMETERS (MPP)	
η_0 (collector efficiency of PVT collector)	0.468
c_1 (heat loss coefficient in W/m ² K)	22.99
c_3 (wind dependence heat loss coefficient in J/m ³ K)	7.57
c_4 (sky temperature dependence of the heat loss coefficient)	0.434
c_5 (collector capacity in kJ/m ² K)	26.05
c_6 (wind dependence conversion factor in s/m)	0.067

Building

Single-Family House (SFH45) has been used as a thermal building model in the investigations. SFH45 is based on IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38 and was developed in such a way that it can represent heating and domestic hot water demand of a new building with a good thermal insulated building envelope. The complete description of the building and boundary conditions is explained in (Dott et al., 2013), e.g. the building details such as walls, windows, ventilation, shading, internal loads. The model was adjusted and adapted in accordance with the IEA SHC & HPP T44/A38 framework during the Project "Geo-Solar-WP" for the boundary conditions of ISFH simulations in TRNSYS and documented in (Bertram 2013). In Figure 1, the simplified view of the SFH45 building model also can be seen. The building was simulated as one thermal zone model with total floor area (first and second floor) of 140 m² and internal capacities of building structures. In the model, internal walls are simplified as one 200 m² large inner walls. The total heat demand of the building is approx. 48 kWh/m²a with floor heating (thermal capacitance of 40.000 kJ/K) for the Zurich location. The tapping profile is derived from DIN EN 16147 with an energy demand of 5.845 kWh/d.

Heat pump

In the investigation, brine-water heat pump (HP) has been used with thermal power of 7.24 kW and the COP of 4.4 by B0/W35 according to the standard DIN EN 14511. This heat pump has been designed to integrate with PVT collectors as a single heat source for low-temperature heating systems; therefore, the heat pump can work up to the minimum inlet temperature of -15 °C at the evaporator side. Moreover, the heat pump has a backup electrical heater of 6 kW; however, during the investigation; the backup heater has not been used, as the heat pump has been set to monovalent operation.

Thermal water storage

The thermal combi storage has been used to supply heat and hot water to the building. It has a capacity of 560 litres with stratified charging. The storage inlets are shaped in slanted connections, with the aim to reduce thermal losses due to internal pipe circulation. An internal heat exchanger with an area of 4.1 m² heats the cold water to supply DHW. Three immersion temperature sensors have been placed over the height of the tank to assess the performance and controlling of tank temperature, as Figure 4 shows. Through these sensors set, the temperature of each layer of the tank can be well maintained and evaluated. The top and the bottom sensors measure the DHW temperature and SH temperature respectively. Both layers are heated up regularly with the heat pump. For the DHW layer, the defined temperature limit is 55 °C with -5 K hysteresis, and for the SH layer, the temperature limit is based on the heating curve from IEA SHC TASK 44 (Dott. et al., 2013) with -3 K hysteresis.

DHW and SH Emulator

The DHW emulator has been realised via three magnetic valves representing three different tapping consumers. The flow rate of the valves are adjusted manually to match the flow rate, and then the valve is controlled using LabVIEW automatically based on tapping energy profile. In this way, hot water can be drawn from the thermal tank, and the household water consumption profile can be represented.

The SH emulator primarily consists of a three-way mixing valve, temperature sensors, flow meter, PID controller, and heat exchanger. Whenever dynamic building simulations in TRNSYS demands the heating, the supply temperature is transmitted to TRNSYS via LabVIEW. The supply temperature is the actual outlet temperature from the storage tank. The TRNSYS simulated return temperature and the flow rate is adjusted in the emulator.

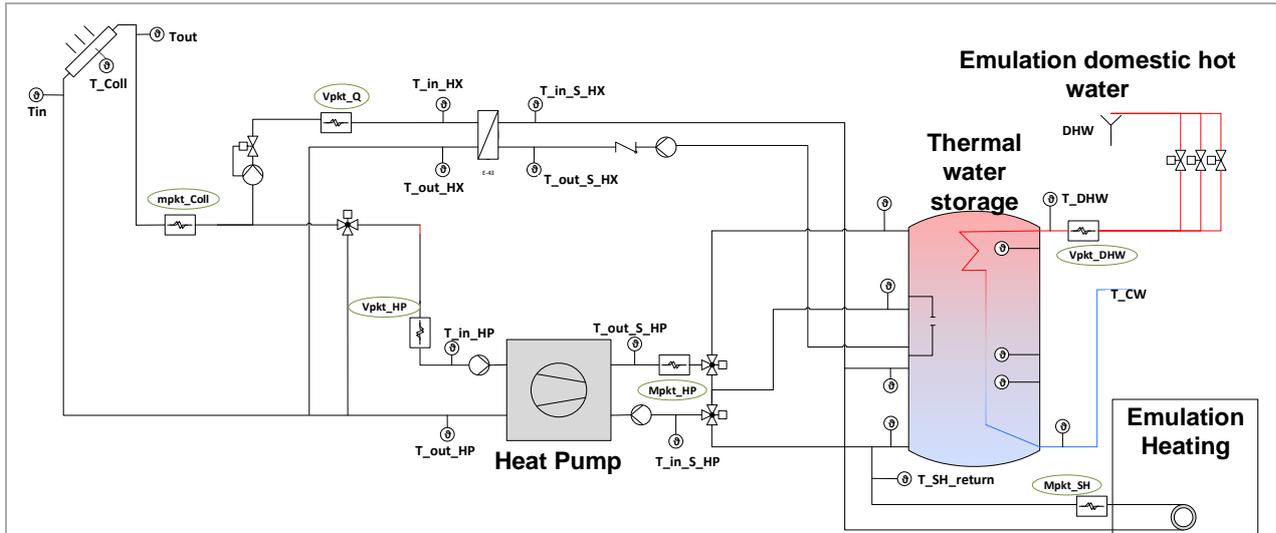


Figure 4: Detailed hydraulic schematic and measurement setup of the investigated PVT - heat pump HiL system

Monitoring and controlling

For the temperature measurement, PT100 sensors have been used, and sensor accuracy is classified according to DIN EN 60751 Class A standard with the tolerance limit of $\pm (0.15 \text{ }^\circ\text{C} + 0.002 T)$. Figure 4 shows different points, where temperatures of PVT, heat pump, thermal storage tank, emulators have been measured. Coriolis flow measurement devices were used to measure the mass flow rate at different positions.

Data acquisition was performed with an interval of a one-second time-step.

Weather

Figure 5 shows weather data such as precipitation, mean ambient temperature (T_{ambient}), minimum ambient temperature ($T_{\text{min_ambient}}$), solar radiation (Solar irradiance), and the wind speed near the collector plane (Wind) during measurement days

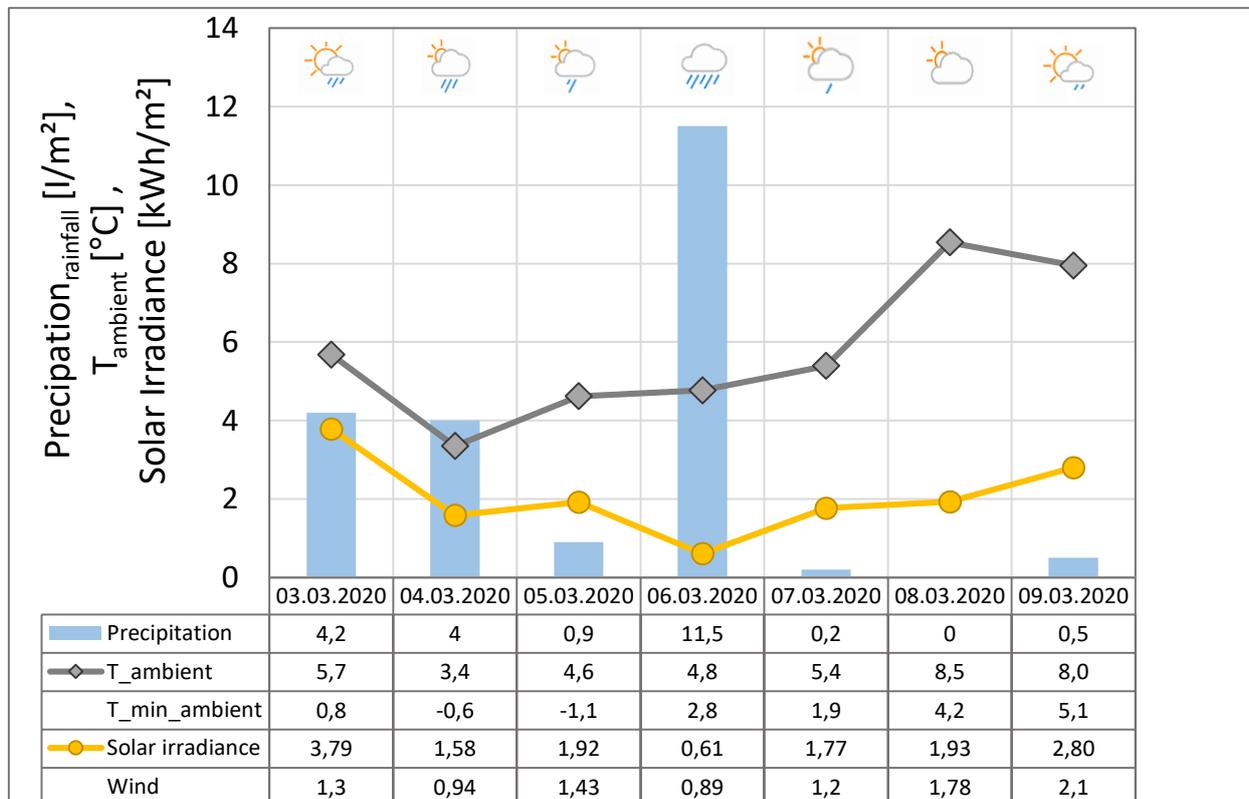


Figure 5: Weather conditions during Hardware in the Loop measurements

RESULTS AND DISCUSSION

Validation of heat sink (SH and DHW)

The initial phase of the HiL investigation aims at analysing and validating the real-time simulation and emulators. Therefore, the quantitative validation of SH demand and DHW is presented in Table 2 over investigated days. In terms of the maximum relative difference was 3.7 % for SH and 1.08 % for DHW between TRNSYS simulation and the emulation. The absolute average deviation over the one-week experiment period has detected less than 3 % for SH emulation and less than 1 % for DHW. As a result, it is proven that the emulation represents the thermal behaviour of dynamic simulated building (SH and DHW) with a good approximation.

Table 2: Quantitative system validation by comparing Hardware in the loop Simulations and Emulators

DATE	Space heating in kWh		Relative Difference %
	Emulation	Simulation	
03.03.2020	28.9	29.7	2.78 %
04.03.2020	44.1	45.5	3.12 %
05.03.2020	36.2	36.9	1.89 %
06.03.2020	44.4	45.9	3.16 %
07.03.2020	28.8	29.9	3.77 %
08.03.2020	25.7	26.2	2.02 %
09.03.2020	33.0	33.9	2.44 %
Total	241.0	247.9	2.77 %

DATE	DHW in kWh		Relative Difference %
	Emulation	Simulation	
03.03.2020	5.91	5.85	1.04 %
04.03.2020	5.90	5.85	0.79 %
05.03.2020	5.91	5.85	1.06 %
06.03.2020	5.91	5.85	1.08 %
07.03.2020	5.90	5.85	0.79 %
08.03.2020	5.91	5.85	1.08 %
09.03.2020	5.89	5.85	0.67 %
Total	41.33	40.95	0.92 %

System Performance Evaluation

As explained above, during the experiments, the system was tested with dynamic SH and DHW load; hence, for the evaluation of the system, different performance indicators were defined. These indicators are explained below in eq. 1 to 4 and the first results are presented in Figure 6. The first performance indicator is the “ HPF_{SHP} ” (Heating performance factor) of the system. It defines the ratio between amount of heat delivered by the system to the electrical energy consumed over a specified period. In this paper, the “ HPF_{SHP} ” is calculated on a daily basis. Moreover, to make a system comparable with other systems, the electrical consumption of the heating and

the water circulation pump of the building is not included in the system calculation. The index is according to IEA Task - 44 SHP boundary conditions (Malenković et al., 2013).

$$HPF_{SHP} = \frac{\int (\dot{Q}_{SH} + \dot{Q}_{DHW}) dt}{\int (\dot{E}_{HP} + P_{ump}) dt} \quad (8)$$

Where, \dot{Q}_{SH} is the heat delivered to space heating; \dot{Q}_{DHW} is the heat delivered for domestic hot water; and $\dot{E}_{HP+Pump}$ is electricity used by the heat pump compressor and condenser/ evaporator pump.

Subsequently, the system consists of PVT collectors as a source for the heat pump; hence the generated amount of electricity from PV is also included in the performance evaluation. However, there is no battery storage in the system; therefore, only self-consumed PV electricity is included for the calculation with the energy balance based on one second time step. As a result, the second performance factor is named in eq. 2 as “ HPF_{SHP-PV} ”, which includes the self-consumed electricity.

$$HPF_{SHP-PV} = \frac{\int (\dot{Q}_{SH} + \dot{Q}_{DHW}) dt}{\int (\dot{E}_{HP} + P_{ump} - \dot{E}_{PVT_el}) dt} \quad (2)$$

Where, \dot{Q}_{SH} , \dot{Q}_{DHW} , $\dot{E}_{HP+Pump}$ are same as explained in eq 1. \dot{E}_{PVT_el} includes the self-consumed electricity fraction by heat pump compressor and condenser, evaporator pump.

Figure 6 shows the daily heating performance factor (“ HPF_{SHP} ” and “ HPF_{SHP-PV} ”) without and with direct PV consumption on the left axis, together with SH and DHW demand on the right axis during the HiL tests. In addition to that, Table 3 shows the daily average flow and return temperature for DHW and SH during HiL tests.

Table 3. Average temperatures (flow and return) on the heat sink side during measurements

DATE	DHW in °C		SH in °C	
	Flow	Return	Flow	Return
03.03.2020	51.64	12.19	30.76	22.40
04.03.2020	51.52	12.44	30.49	23.19
05.03.2020	52.61	12.54	31.43	23.09
06.03.2020	51.80	12.42	31.15	22.64
07.03.2020	51.50	11.85	31.57	22.72
08.03.2020	51.81	11.76	31.28	22.18
09.03.2020	51.62	12.18	30.76	22.40
Average	51.79	12.20	31.06	22.66

As Figure 6 shows, the system performance (HPF_{SHP}) usually remained above 3.2 with an average of 3.3, except one incident, where it dropped below 3 (04.03.2020).

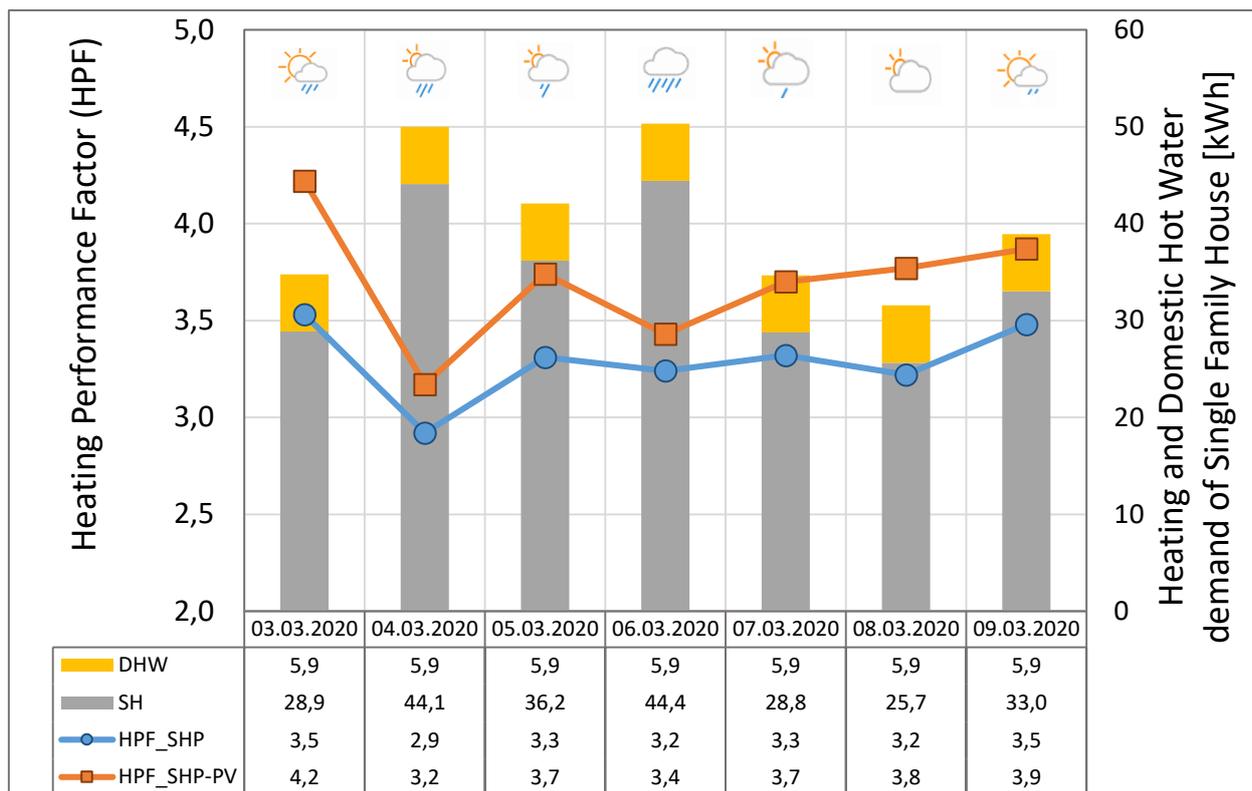


Figure 6: Daily heating performance factor of Hardware in the Loop measurements

This is due to the fact that the average mean ambient temperature was 3.4 °C, which was the lowest compared to other measuring days, and the minimum temperature fell below 0 °C with little solar radiation. Hence, the heat demand was high on that day with almost 50 kWh.

As specified before, the focus of the paper and the HiL experiment was to estimate the performance of PVT-heat pump system under representative weather conditions. As a consequence, on a cold sunny day (03.03.2020) with slight rain, the HPF_{SHP} of the system during the experiment reached 3.5 and utilised the maximum solar thermal energy in a very efficient way. Also, during the same day, the system performance including self-consumed PV electrical energy improved by 0.7 and " HPF_{SHP-PV} " increased to 4.2 due to the high solar radiation on the collector plane (67.4 kWh on the total area of 17.8 m²).

On the contrary, during a rainy day (06.03.2020) with approx. 11 litre/m² of precipitation and almost no direct solar irradiation, the system also worked very well with a performance factor of 3.2; hence, this can also prove that under these conditions the PVT collector can work as an effective environmental heat exchanger.

In this research work, PVT collector is used with the heat pump system, and the heat pump can work with minimum inlet temperature up to -15 °C on the evaporator side and considered as a low-temperature heating application. Hence, the performance factor of the heat pump before storage (HPF_{bst}) would also be

relevant for the system evaluation. The HPF_{bst} is derived according to TASK 44 (Malenković. et. al., 2013) and explained in eq. 3. It represents the total heat generation from the heat pump to the electrical energy consumed by the heat pump compressor and condenser/evaporator pump.

$$HPF_{bst} = \frac{\int \dot{Q}_{HP} dt}{\int \dot{E}_{HP+eva_Pump} dt} \quad (3)$$

Where, \dot{Q}_{HP} is heat generation from heat pump; $\dot{E}_{HP+Pump}$ is electricity used by the heat pump compressor and evaporator pump

The result of HPF_{bst} during HiL measurements shows table 4. The average performance factor was perceived 3.65 during the measurements.

The next performance indicator is used to evaluate the PVT collectors, as a source for the heat pump is the solar fraction (SF). This can be expressed in two different ways: the thermal fraction " $SF_{PVT_{thermal}}$ " and the electrical fraction " $SF_{PVT_{electrical}}$ " excluding the heating and hot water circulation pump energy.

The thermal fraction ($SF_{PVT_{thermal}}$) is useful in order to evaluate the PVT thermal fraction, where the solar heat goes parallel to heat pump directly on the sink side. Nevertheless, in this present work, only PVT is coupled as a heat source for the heat pump system (in series); thus, this indicator is not presented in the scope of this paper. The indicator " $SF_{PVT_{electrical}}$ " is the ratio between electrical energy produced by PV

collector to the self-consumption by the system and is shown in eq. 4. The self-consumption varies from system to system, depending on how the system boundary is defined. In this investigation, only self-consumed electricity by the heat pump is considered and calculated with the energy balance of the one-second time step. Hence, this indicated factor cannot exceed 1 because the maximum use of electricity from PVT for the heat pump is $\dot{E}_{PVT} \leq \dot{E}_{HP + Pump}$, the excess generated electricity from PV is fed to the grid.

$$SF_{PVT_{\text{electrical}}} = \int \frac{\dot{E}_{PVT}}{\dot{E}_{HP + Pump}} dt \quad (4)$$

Where, \dot{E}_{PVT} is electricity generation from PVT; and $\dot{E}_{HP+Pump}$ is the same as explained in eq 1.

Table 4: Performance factor of Heat Pump and self-consumption PV electrical energy during HiL measurement

DATE	HPF_{bst}	$SF_{PVT_{\text{electrical}}}$ (%)
03.03.2020	3.76	16.26 %
04.03.2020	3.35	8.08 %
05.03.2020	3.58	11.47 %
06.03.2020	3.67	5.57 %
07.03.2020	3.58	10.18 %
08.03.2020	3.70	14.68 %
09.03.2020	3.92	10.06 %
Average	3.65	10.90 %

The self-consumption varies from system to system, depending on how the system boundary is defined. In this investigation, self-consumed electricity is considered only for the heat pump and as mentioned above, calculated with the energy balance of one-second time step. The total electricity consumption of the system within a period of one week was reduced by approx. 11 % with self-consumption of PV electrical energy. However, the self-consumption fraction can be increased by changing the boundary conditions of the system, i.e. by including household electricity consumption, or by integrating battery storage.

CONCLUSION

In the paper, a PVT coupled heat pump system is investigated with HiL real-time test environment. The goal of the investigation is to analyse and evaluate the system for the energy supply of a single-family house under dynamic weather conditions. Hence, PVT collector, heat pump, and buffer storage have been installed as hardware, whereas dynamic load (space heating and domestic hot water) were simulated in TRNSYS and emulated. Throughout the investigation, simulations and emulation were validated, and the result showed good agreement: the deviation between simulation and emulation was less than 3 % for SH and less than 1 % for DHW. Based on the validated system, further HiL experiments were carried out, and performance indicators were identified and discussed.

The following points summarise the essential findings and performance indicators:

- The mean heating performance factors HPF_{SHP} and HPF_{SHP-PV} were observed 3.3 and 3.7 respectively through the measuring period of 7 days in winter
- During the sunny winter day, higher solar energy could be harvested from PVT with HPF_{SHP} of 3.5, and at the same time performance factor including self-consumed electricity was increased to 4.2
- For the rainy and cloudy day, the PVT collector acted as a good environmental heat exchanger thanks to the 10 times larger fin area than the PV surface and HPF_{SHP} values reached above 3.2
- The average self-consumed electricity fraction from PVT through the HiL experiment was approx. 11 %. This could be increased further by implementing a PV oriented control strategy.

Overall, when the investigated PVT collectors are directly coupled with the heat pump as a sole source (thermal side), the achieved system efficiency is good and can be used as a noise-free alternative to an air source heat pump. Also, by considering PV electrical generation, the system performance factor was increased significantly.

In the next phase of the project, the system will be investigated under higher building load with higher heating and domestic hot water demand. Further HiL tests will be carried out under different/extreme conditions such as with snow-covered PVT. Additional investigations will focus on the demand-oriented system control to exploit the potential of PVT as both thermal and electrical source.

Finally, the work confirms the advantages of the HiL tests as a flexible and time-saving approach to evaluate complex energy supply systems in the building sector under real boundary conditions. The HiL tests can also include many complex systems such as PVT with ice storage.

ACKNOWLEDGEMENT

The presented work and the results are part of the research project "TwinPower - 0325867B", which is funded by the German Federal Ministry of Economy and Energy (BMWi), and supported by the Lower Saxony Ministry of Science and Culture. The authors are grateful for the support and responsible for the content of the publication.

REFERENCES

- Bertram, E., Glembin, J., Rockendorf, G., 2012. Unglazed PVT collectors as an additional heat source in heat pump systems with borehole heat exchanger. IEA, International conference on Solar Heating and Cooling (SHC) for Buildings and Industry in San Francisco, USA

- Bertram, E., 2013. Annex F to Report C3 of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38, Platform independence checks reported for T44A38 (Report of Subtask C Nr. Adaption for the IEA SHC & HPP T44/A38. Boundary Conditions of ISFH Simulations in TRNSYS).
- Bridgeman, A., Harrison, S., 2008. Experimental evaluations of Indirect Solar Assisted Heat Pump System for Domestic Water Heating. Proceedings EuroSun- 1st International Congress on Heating, Cooling and Buildings, Lisbon, Portugal.
- Dott, R., Haller, M.Y., Ruschenburg, J., Ochs, F., Bony, J., 2013. The Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38: Part B: Buildings and Space Heat Load, A technical report of subtask C Report C1 Part B.
- El-Baz, W., Mayerhofer, L., Tzscheuschler, P., and Wagner, U., 2018, Hardware in the Loop Real-Time Simulation for Heating Systems: Model Validation and Dynamics Analysis.
- El-Baz, W., Tzscheuschler, P., Wagner, U., 2018. Experimental study and modeling of ground-source heat pumps with combi-storage in buildings.
- Giovanetti, F., Lampe, C., Kirchner, M., Littwin, M., Asenbeck, A., and Fischer, S., 2019. Experimental investigations on photovoltaic-thermal arrays designed for the use as heat pump source. International Solar Energy Society (ISES) Solar World Congress (SWC) 2019 in Santiago, Chile.
- Helbig, S., Kirchner, M., Giovanetti, F., Lampe, C., Littwin, M., Kastner, O., 2018. PVT-Kollektoren als bisolare Wärmepumpenquelle Ein Simulationsvergleich zwischen Polysun und TRNSYS. Symposium Thermische Solarenergie Juni 2018 Bad Staffelstein.
- Ito, A., Miura, N., Wang, K., 1999. Performance of a heat pump using direct expansion solar collectors. *Solar Energy*, 65, 3, 189-196.
- Lampe, C., Kirchner, M., Littwin, M., Giovanetti, F., Asenbeck, S., Fischer, S., 2019. Experimentelle Untersuchungen an Testfeldern mit SOLINK photovoltaisch-thermischen Kollektoren. Proceedings Symposium Solarthermie und Innovative Wärmesysteme 2019, Bad Staffelstein, Germany.
- Leibfried, U., Wagner, A., Abdul-Zahra, A., 2017. Schlussbericht: Hocheffiziente, auf intelligenter Verknüpfung von PVT- und Wärmepumpentechnik basierende Wärmeversorgung für Gebäudebestand und Neubau. Teil 1: Funktionsentwicklung und Aufbau eines Anwender-Konsortiums.
- Leibfried, U., 2018. SOLINK PVT Energieversorgungssysteme für Wärmepumpen. Proceedings Symposium Solarthermie 2018, Bad Staffelstein, Germany.
- Lipp, J.P., 2015. Flexible Stromerzeugung mit Mikro-KWK-Anlagen.
- Malenković, I., Pärish, P., Eicher, S., Bony, J., Hartl, M., 2012. Definition of Main System Boundaries and Performance Figures for Reporting on SHP Systems, Deliverable B1, IEA SHC Task 44/HPP Annex 38.
- O'Dell, P., Mitchell, J. W., Beckman, W. A., 1984. Design model and performance of heat pumps with refrigerant filled solar collectors. *Journal of Solar Energy*, 106, 159- 164
- Zenhäusern, D., Bamberger, E., Baggenstos, A., 2017. PVT Wrap-Up: Energiesysteme mit Photovoltaisch Thermischen Solarkollektoren. Institut für Solartechnik SPF

TRIPLE-CRITERIA EVALUATION OF HVAC SYSTEM PERFORMANCES WITH DYNAMIC BUILDING SIMULATION

N. Harmathy¹

¹Budapest University of Technology and Economics, Faculty of Architecture,
Department of Building Energetics and Building Service Engineering, Hungary
E-Mail: harmathy@egt.bme.hu

ABSTRACT

The scope of the research was to investigate whether renewable energy source application could contribute to higher performance, against a typical efficient HVAC system considering mandatory energy requirements as usually applied in commercial buildings. Two HVAC solutions, an air-source heat pump and a ground source heat pump system was modelled, simulated and evaluated using triple-criteria evaluation method. The HVAC systems were evaluated from the aspect of energy use, environmental and economic performance. Results demonstrated that the ground source heat pump due to its higher initial investment will demonstrate approximately 28% higher performance in all categories compared to an air source system.

INTRODUCTION

A lot of effort regarding energy savings has been spent due to large environmental problems and limited fossil energy sources. According to the European Energy and Climate Change Policy and its targets for 2050, different options and solutions are explored in order to reduce greenhouse gas emissions. The EU's first step is to reduce the energy demand of buildings through compliance with envelopes thermal property regulations and afterwards the utilization of efficient HVAC systems and renewable energy sources in order to cut down the buildings carbon footprint. To achieve this target and ensure high environmental standards and stable energy prices, Hungary needs to make substantial investments in available renewable energy sources. (WEC 2019, NORT 2019)

The motivation of the research was to investigate whether energy efficient buildings which fulfill the minimum energy standards do demonstrate high energy performance. The hypothesis was to investigate and prove that renewable energy source application could contribute to higher performance, against a typical efficient HVAC system considering mandatory energy requirements.

The research scope was to investigate and evaluate HVAC solutions using triple-criteria method: energy use, carbon footprint and cost to formulate a systematic solution for wide audience with preferable and applicable results. Applied research methodology was dynamic building performance simulation in order to evaluate the energy, environmental and

economic performance of a typical office building in temperate climate conditions of Hungary. The dynamic simulations were performed according to the ASHRAE 90.1 standards (ASHRAE 2017) with EnergyPlus software (EnergyPlus 2016). ASHRAE climate zones refer to worldwide locations. The European weather data for Budapest were used from the data packages of ASHRAE Climate Design Conditions (ASHRAE CDC 2016), EnergyPlus Weather Data by Region (EP Weather 2017) and Hun TNM 7/2006 directive (TNM 2019).

Integrated design process and dynamic energy simulation is widespread in the field of energy performance optimization and strategic planning of building energy efficiency. Dynamic simulation is used in determining construction properties, occupant comfort, HVAC system energy demands, energy conservation techniques etc. (Sijanec et al. 2016, Kmekova et al. 2015, Sacht et al. 2015). In one of our previous researches, we used multi-criteria optimization methodology to determine an optimal energy retrofit solution in case of adequate envelope glazing selection (Harmathy 2015). Our previous research demonstrated an optimized building envelope model using multi-criterion optimization methodology in order to determine efficient window to wall ratio and window geometry in the function of indoor visual comfort, followed by the assessment of envelope's influence on the annual energy demand. Optimal design methods for cooling systems considering cooling load analysis using simulation techniques is a topic of interest respectively (Gang et al. 2015). Energetic and environmental performance assessment can be parallel analyzed (Krstic-Furundzic et al. 2016). Extensions on the urban level were made respectively from the aspect of building envelope design for overall energy efficiency (Eui-Jong et al. 2014). Residential building refurbishment methods have been analyzed in multiple researches for different climate conditions (Dixon et al. 2010). Authors used two calculation methods for the energy consumption for heating: the quasi-steady-state method and the dynamic simulation method. The values obtained by measuring have proven that the difference in the energy consumption was 2.7% and 4.8% (Sumarac et al. 2010).

MATERIALS AND METHODOLOGY

Two multi-zone thermal models were developed for the investigation:

1. Proposed building 1, packaged rooftop heat pump (PRHP) according to energy efficient building minimum requirements, TNM 7/2006 local regulation and
2. Proposed building 2, with application of renewable geothermal energy source using ground source heat pump (GSHP).

Climate data

The climatic data was used from the Meteonorm (Meteonorm 2015) Swiss global database. The meteorological data package for Budapest contained more than 100,000 data. In the simulation process 30 year hourly averages were applied. In the dynamic simulation we used the following climatic data; air temperature, relative humidity, direct and indirect solar radiation, pressure, wind direction and wind speed. The weather data for Budapest were used from the data packages of ASHRAE Climate Design Conditions (ASHRAE CDC 2017).

Building representation

Budapest as most European cities has a central historic core developed mostly at the end of the 19th and first quarter of the 20th century. The design and construction of new buildings in the city core in many cases is a difficult architectural and engineering task, due to site, location, renewable energy supply and shading restrictions.

A representations of a typical inbuilt area of a reference office building according to the story number (5 stories) and height (3.5m per story), and inbuilt parcel regulations is shown in Figure 1.

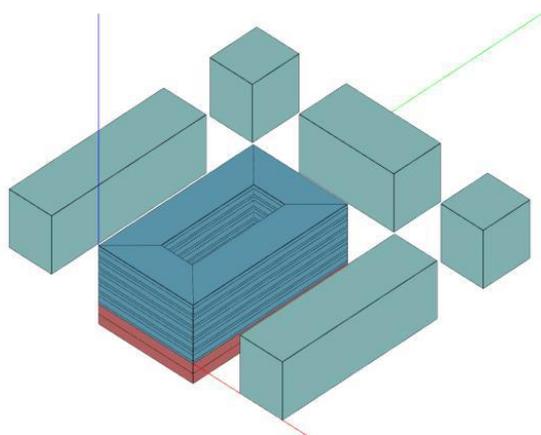


Figure 1: Thermal model, Axonometric view

The thermal model consisting of 5 stories and a two story underground parking was divided into 5 thermal zones. Each level forms a thermal zone. The parking was excluded from the zoning calculation since garage heating and cooling is not provided. Demand Control Ventilation (DCV) is mandatory in the parking garage for CO exhaust and jet fans in case of fire protection. In the research major energy consumers were analyzed, such as HVAC, equipment and lighting. The thermal zones design summary is shown in Table 1.

Table 1: Thermal zone summary

Thermal zone	Area [m ²]	Volume [m ³]	Window Area [m ²]
All zones from 1 to 5	1200	4200	420
Total	6000	21000	2100

Building construction

The building constructions thermal properties and fenestration properties were determined according to the Hungarian Energy Efficiency Regulations (TNM rendelet 7/2006 Appendix 5 and Appendix 6) (TNM 2019) The bearing construction was reinforced concrete skeleton, with exterior walls made from prefabricated empty cell concrete blocks, 30 cm and 1.14 W/mK thermal conductivity.

Expanded Polystyrene thermal insulation was applied, 15 cm for the outer layer of exterior wall, 15 cm EPS for the vegetated roof and 10 cm EPS for the ground floor connected with the garage.

The fenestration used was typical steel framed double glazing system with argon gas filling. The overall thermal transmittance of the fenestration system was 1.4 W/m²K. All construction assemblies are shown in Table 2.

Table 2: Building envelope and fenestration properties

Construction	Reflectance	U-value [W/m ² K]
Ext. Wall	0.08	0.212
Green roof	0.3	0.164
f-factor ground floor	-	0.135
c-factor undergr. wall	-	0.47
Construction	U-value [W/m ² K]	Glass SHGC Light Trans.
Ext. window with frame	1.4	0.399 0.601

ENERGY PERFORMANCE SIMULATION RESULTS

The heating and cooling energy demands and consumptions were calculated on an annual basis in hourly time steps, in total 8760 hours. The thermostat

schedules were set according to the following date, time intervals and indoor air temperature levels as shown in Table 3. The temperature schedules were assigned according to the default ASHRAE schedule set in EnergyPlus “Medium Office Heating Setup” and “Medium Office Cooling Setup”. the two models applied the default schedule sets.

Table 3: Thermostat schedules

Schedule	Date	Time	Indoor air temp.
Heating setup	01.10. – 31.03.	Mon to Fri	21°C – 23°C
		6-22h	
Mon to Fri 22-6h		min. 16°C	
Weekend 0-24h		min. 16°C	
Cooling setup	31.03. – 30.09.	Mon to Fri	24°C – 26°C
		6-22h	
Mon to Fri 22-6h		max. 28°C	
Weekend 0-24h		max. 28°C	

The simulation was performed according to heat balance calculations method used in EnergyPlus software. The two models, had identical interior lighting loads, plug loads, infiltration, outdoor air supply and occupancy. The annual summary of all identical loads can be seen in Table 4.

Table 4: Internal loads and definitions report

Definition	Value	Unit
People	18	m ² /people
Equipment	7.64	W/m ²
Lights	10	W/m ²
Infiltration	0.007	m ³ /h /m ²
Ventilation	8.5	m ³ /h /person

HVAC modeling

Two HVAC systems were modeled for the simulation to determine the annual energy consumption, operation costs and carbon footprint:

- Proposed HVAC 1, Packaged rooftop heat pump (PRHP) according to energy efficient building minimum requirements. The sizing of the system and components is presented in Table 5 and 6. The components of the HVAC system are the following:
 - hot water source and cooling source in packaged rooftop heat pump,
 - air to air plate heat exchanger with 76% efficiency,
 - constant volume fans for outdoor air supply.

Table 5: Cooling and heating coil DX Single Speed

Coil	Design Size Rated Air Flow Rate [m ³ /s]	Total Cooling Capacity [W]	Gross Rated Sensible Heat Ratio
Coil cooling dx	25.67	637342	0.698083

Coil	Design Size Rated Air Flow Rate [m ³ /s]	Gross Rated Heating Capacity [W]	Resistive Defrost Heater Capacity [W]
Coil heating dx	25.67	352566	637342

Table 6: Air loop HVAC summary

	Sum of Max. Flow Rates [m ³ /s]	Heating Design Air Flow Rate [m ³ /s]	Cooling Design Air Flow Rate [m ³ /s]
PRHP	25.67	8.15	25.67

– Proposed HVAC 2 ground source heat pump (GSHP) with application of renewable geothermal energy source for heating and cooling through ground source heat pump system. Water to air heat pump with single duct VAV fans with no reheat is supplying warm and cool air to the thermal zones. Parasitic electric coil heating is provided which is operating when outdoor conditions make it necessary. The sizing of the system and components is presented in Tables 7 and 8. The components of the GSHP HVAC system are the following:

- heating and cooling supply by ground source vertical heat exchanger, input data can be seen in Table 9,
- variable speed pumps in water loop,
- additional cooling coil DX single speed,
- air to air plate heat exchanger with 76% efficiency
- VAV fans for outdoor air supply.

Table 7: Cooling coil summary per thermal zone, water to air GSHP

Thermal zone	Air Flow Rate [m ³ /s]	Total Cooling Capacity [W]	Sensible Cooling Capacity [W]	Water Flow Rate [m ³ /s]
Zone 1	4.41	65358	55602	0.00282
Zone 2	4.79	70667	60327	0.00305
Zone 3	5.16	75777	64870	0.00328
Zone 4	5.57	81607	70085	0.00353
Zone 5	5.73	84099	72102	0.00364

Table 8: Heating coil summary per thermal zone, water to air GSHP

Thermal zone	Air Flow [m ³ /s]	Heating Capacity [W]	Water Flow Rate [m ³ /s]
Zone 1	4.41	65358	0.00282
Zone 2	4.79	70667	0.00305
Zone 3	5.16	75777	0.00328
Zone 4	5.57	81607	0.00353
Zone 5	5.73	84099	0.00364

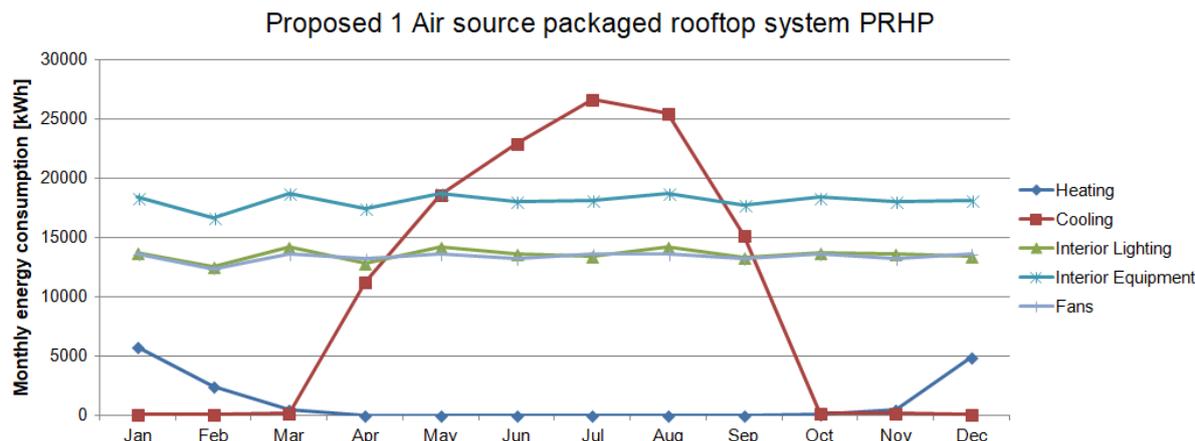


Figure 3: Energy use by category for PRHP system

Table 9: Ground source vertical heat exchanger

Number of bore holes	28
Bore hole length (pipe length)	120 m
Pipe radius	150 mm
Ground thermal heat capacity	2347 kJ/(m ³ K)
Average ground temperature	14 °C
Ground thermal conductivity	1.8 W/mK
Pipe thermal conductivity	0.4 W/mK

Indoor environmental quality determination for modeling validation

The validation of the thermal models was performed according to operative temperature assessment. In Figure 2 a randomly selected office space on the third floor is demonstrated.

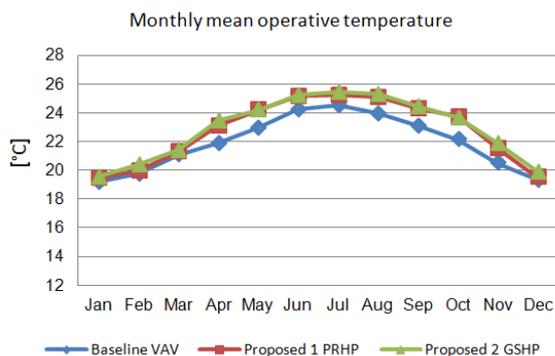


Figure 2: Validation using operative temperature

Results and energy performance evaluation

The calculation of annual heating and cooling energy consumption for the baseline and the two proposed HVAC systems was performed according to ASHRAE 90.1 2010 Standard. The input parameters of the occupants, equipment and lighting gains were used according to the energy design principles in case of the two models.

The comparison and evaluation of the HVAC systems overall performance is demonstrated according to three criteria:

1. End-use site and source energy consumption
2. Carbon footprint
3. Energy cost for building operation

The triple-criteria evaluation method demonstrates a more comprehensive overview of the design HVAC system selection during the preliminary design phase of office buildings since it will highlight system performances, cost efficiencies and environmental benefits. The economic calculations and carbon emissions were demonstrated for the Hungarian market using utility costs and power plant carbon emission factors from Budapest. The building performance can be demonstrated for any country using actual utility costs and energy production emissions factors due to the method's flexibility.

End-use site and source energy consumption

The dynamic energy performance simulations were performed on 8760 hour basis for the aforementioned climate database, building construction, thermal zones, internal gains and operation schedules. The total site energy consumptions are presented in Table 10. The typical HVAC PRHP system (Proposed 1) demonstrated 2430 GJ consumption due to its efficiency. Nevertheless the GSHP's energy consumption was 28% less compared to the PRHP. The end-uses per category can be seen in detail in Table 11.

Table 10: Annual total site energy per scenarios

Proposed 1 – Packaged rooftop heat pump (PRHP) according to energy efficient building minimum requirements and 76% heat recovery on air side loop	
Total Energy [GJ]	Energy use per prea [MJ/m ²]
2430.43	405.07
Proposed 2 – Energy efficient building with geothermal heat source GSHP and 76% heat recovery on air side loop	
Total Energy [GJ]	Energy use per area [MJ/m ²]
1757.27	292.88

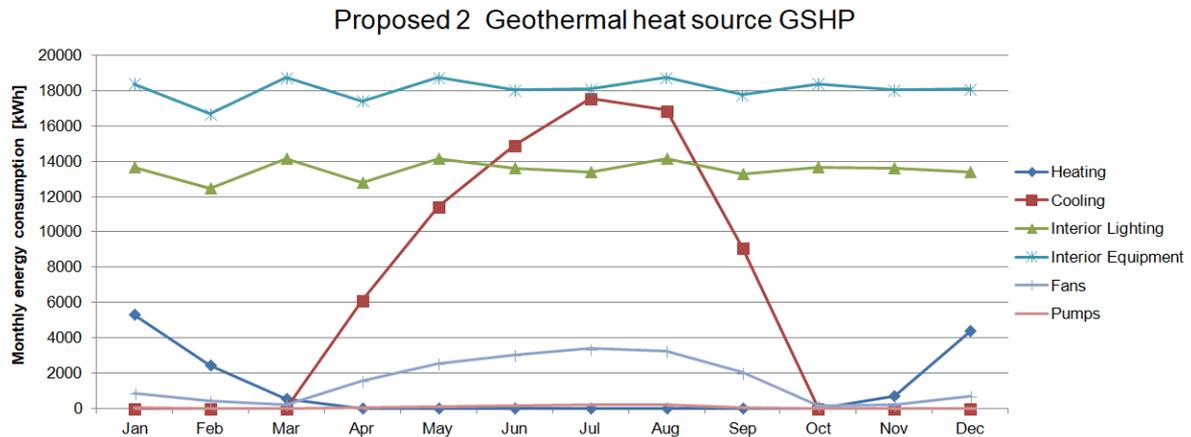


Figure 4: Energy use by category for PRHP system

Table 11: End use energy performance summary of Baseline and Proposed buildings

End-use category	Proposed 1 Electricity [GJ]	Proposed 2 Electricity [GJ]
Heating	50.91	48.30
Cooling	435.17	273.53
Lighting	584.32	584.32
Equipment	781.90	781.90
Fans	578.14	66.13
Pumps	0	3.09
Total End Uses	2430.43	1757.27

The energy consumption of the HVAC systems was analyzed in detail. The Proposed HVAC 1 PRHP DOAS system’s monthly energy consumption can be seen in Figure 3. The heating consumption is significantly lower compared to the Baseline VAV system; nevertheless the fans have 10 times higher electricity consumption due to the fan-coil units and air source heat pump system. The rated COP of the cooling coil DX was 3 and for heating coil DX was 5 by default, total fan efficiency was 0.7.

Proposed HVAC 2 GSHP performed as to most efficient system from the aspect of end-use energy, Figure 4. The findings presented that the electricity consumption for heating is identical with the PRHP DOAS system. Cooling electricity consumption has shown 37% reduction compared to PRHP.

Source energy evaluation

End-use source energy for the three systems was calculated according to the hungarian source energy conversion factors (HEER TNM 2019).

Proposed system 2 GSHP still remained with the highest performance with approximately 28% in source energy consumption Table 12.

Table 12: Annual total source energy per scenarios

Proposed 1 – PRHP with 76% HR on air side loop		Proposed 2 –GSHP and 76% HR on air side loop	
Total Source Electricity [kWh]	Energy Per Conditioned Area [kWh/m ²]	Total Source Electricity [kWh]	Energy Per Conditioned Area [kWh/m ²]
1687800	281	1220330	203

Carbon footprint evaluation

The carbon emission of the HVAC systems operation was calculated on annual basis according to the hungarian carbon emission factors, where proposed 1 PRHP resulted in higher CO2 emission of 616 tons/a, while Proposed 2 GSHP demonstrated 445 tons/a.

The results demonstrated that the end-use energy compared to the source energy and carbon emission demonstrated completely different results. If energy production and carbon footprint are not taken into account during the decision making process, the environmental sideeffects could be really harmful. The investigation highlights the importance of taking into consideration the source energy and carbon emission results during and overall analysis of the buildings environmental impact.

Economic evaluation

According to LEED v4 Green building certification in the Energy and Atmosphere category credits for optimizing building energy performance reflect the economic improvement of the energy performance. The building operation is reflected through achievement of increasing levels of energy performance beyond the prerequisite standard to reduce environmental and economic harms associated with excessive energy use. (USGBC 2019)

The economic analysis was performed according to the end-use consumption using Hungarian utility tariffs. The gas and electricity rates along with the total end-use energy are shown in Table 13. (Gas tariff 2019, Electricity tariff 2019) The flat-rate calculation method was used according to ASHRAE 90.1 2010 Appendix G.

Table 13: Annual energy cost comparison

Proposed 1 – typical energy efficient building with packaged rooftop heat pump and 76% heat recovery on air side loop			
Electricity	0,081 EUR/kWh	675.120 kWh	54.684
Proposed 2 – Energy efficient building with geothermal heat source GSHP and 76% heat recovery on air side loop			
Electricity	0,081 EUR/kWh	488.132 kWh	39.538

The findings demonstrated that Proposed system 2 efficient PRHP has the highest annual energy cost for operation.

Results summary

The summary of results for both HVAC systems are shown in Table 14.

Table 14: Results summary on annual basis

System	Primary energy consumption [kWh/m ² /a]	Carbon emission [CO ₂ ton/a]	Operation energy cost [EUR]
PRHP	281	616	54.684
GSHP	203	445	39.538
Reduction	28% in all categories, due to electricity supply for both heating and cooling		

The results demonstrate that the energy source depending weather it is aero thermal or ground thermal could significantly contribute to the efficiency of the overall energy consumption of the building. It can be concluded that the selection of the energy source such as aero thermal, ground or hydro thermal should be considered according to the climatic data, soil and location of the building if designers are seeking a de-centralised solution.

In case of Hungary the soil characteristics are adequate for geothermal energy utilization and the onsite drilling of boreholes is also cost efficient due to the soil characteristics and contents.

CONCLUSION

Findings demonstrated that the end-use energy gives designers insufficient data for adequate decision making in the preliminary design stages. HVAC solutions should be preferably evaluated from a wider aspect which combines multiple-criteria in the design decision making phase.

According to the demonstrated building the geothermal energy utilization can contribute to 28% better performance compared to the air source heat pump system.

The overall recommendation is to evaluate during the preliminary design phase the possibilities of source energy selection with a triple-criteria evaluation to justify which is the most energy, environmental and cost efficient HVAC system for the region.

Further research will include the energy and economic analysis of various HVAC systems for office buildings containing a combination of fossil fuel and/or district energy utilization. The carbon footprint is highly important due to the environmental impact and decarbonization strategy when improving building performance. Materials and construction expenses will be taken into consideration according to the performance and investment aspect of an ongoing project.

Acknowledgement

The research reported in this paper was supported by the Higher Education Excellence Program of the Ministry of Human Capacities in the frame of Artificial Intelligence research area of Budapest University of Technology and Economics (BME FIKP-MI/SC).

REFERENCES

ASHRAE 90.1 Standard. <https://www.ashrae.org/resources> Accessed 2017.

ASHRAE Climate Design Conditions, <http://ashrae-meteo.info/> accessed 2019

Dixon, G., et al., Evaluation of the effectiveness of an energy efficiency program for new home construction in eastern North Carolina, Energy, 35 (2010), pp. 1491–1496

Electricity tariff, <https://www.nkmenergia.hu/foldgaz/Egyetemesszolgalatas/Ugyintezes/Arak-dijszabasok/Aktualis-arak?download>

EnergyPlus Weather Data by Region, https://energyplus.net/weather-region/europe_wmo_region_6 Accessed 2017.

EnergyPlus Weather Data by Region, https://energyplus.net/weather-region/europe_wmo_region_6 Accessed 2017.

- EnergyPlus.
<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/> Accessed 2016.
- Eui-Jong, K., et al., Urban energy simulation: simplification and reduction of building envelope models." *Energy and Buildings*. 84. pp. 193-202. 2014. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.07.066
- Gang, W., et al., Robust optimal design of building cooling systems considering cooling load uncertainty and equipment reliability." *Applied Energy*. 159. pp. 265-275. 2015. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.08.070
- Gas tariff,
<https://www.nkenergia.hu/foldgaz/Egyetemesszolgalatas/Ugyintezes/Arak-dijszabasok/Aktualis-arak?download>
- Harmathy, N., et al., Multi-criterion optimization of building envelope in the function of indoor illumination quality towards overall energy performance improvement." *Energy*. 114. pp. 302-317. 2016. DOI: 10.1016/j.energy.2016.07.162
- Hungarian 7/2006 TNM energy efficiency regulation for buildings,
<https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=A0600007.TNM> accessed 2019.
- Hungarian Energy Efficiency Regulation, TNM 7/2006,
<https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=A0600007.TNM>, Accessed 2019
- Kmekováa, J., Krajčík, M. "Energy efficient retrofit and life cycle assessment of an apartment building." *Energy Procedia*. 78. pp. 3186-3191. 2015. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.77817
- Krstic-Furundzic, A., Kotic, T. "Assessment of energy and environmental performance of office building models: A case study" *Energy and Buildings*. 115. pp. 11-22. 2016. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.06.050
- Meteonorm, <http://www.meteonorm.com/> accessed 2015
- National Office for Research and Technology, Hungarian National Environment Protection and Energy Center,
<https://nkfih.gov.hu/strategy/archive/in-hungary/research-and-development#> accessed 2019
- Sacht, H., et al., Glazing daylighting performance and trombe wall thermal performance of a modular facade system in four different Portuguese cities." *Indoor and Built Environment*. 24 (4). pp. 544-563. 2015. DOI: 10.1177/1420326X14525976
- Sijanec Zavrl, M., et al., A bottom-up building stock model for tracking regional energy targets – a case study of Kočevlje, *Sustainability*. 8 (10). pp. 1-16. 2016. DOI: 10.3390/su8101063
- Sumarac, D. M., et.al.: Energy Efficiency of Residential Buildings in Serbia, *Thermal Science*, 14 (2010), pp. S97-S113
- USGBC, LEED,
<https://www.usgbc.org/node/2614273?return=/credits/new-construction/v4/energy-%26amp%3B-atmosphere>, Accessed 2019
- World Energy Council,
<https://www.worldenergy.org/data/resources/country/hungary/geothermal/> accessed 2019

MODELLING AND SIMULATION OF INNOVATIVE DECENTRAL DOMESTIC HOT WATER SYSTEMS WITH HEAT PUMPS FOR MULTI-FAMILY BUILDINGS

F. Ochs¹, S. Breuss¹, E. Venturi¹, M. Magni¹, G. Dermentzis¹ and S. Fisco¹

¹University of Innsbruck, Unit for Energy Efficient Buildings

E-Mail: Fabian.Ochs@uibk.ac.at

ABSTRACT

Designing cost-optimal and efficient DHW systems for multi-family buildings (MFB) that allow providing a high level of comfort as well as following the hygienic requirements is not trivial. Building and HVAC simulation can help to improve the system design, to find appropriate dimensioning of the components, to improve control strategies and set points, to assist in commissioning the system and finally to detect and fix faults. In order to meet these requirements different decentral heating systems for MFBs were proposed and tested recently.

For decentral, i.e. flat wise DHW preparation systems, it is challenging to model the different scales (flat, building, HVAC system) at different design stages (pre-design, design, commissioning, operation, fault detection) appropriately. DHW comfort (i.e. delay times) can be modelled only on the level of the flat, while the energy performance (distribution and storage losses, efficiency of HVAC system) can only be investigated on building or even district level.

For the entire building, if all flats would be simulated together, different profiles need to be generated in order to account for different times of use (simultaneity of DHW use). Accordingly, stochastic or “smoothed” tapping profiles are required. For large buildings with more than 10 flats such an approach would lead to a very heavy simulation model with extensive simulation times. Contrariwise, a “lumped” model with one heat exchanger would be easy to use but could not predict the dynamics and the return flow temperature correctly.

The paper discusses several modeling approaches and presents results of a case study with decentral DHW heat exchanger in combination with flow type post heater.

INTRODUCTION

In order to reach the goal of a sustainable energy system, the building stock needs a deep refurbishment and new buildings need to be build such that they correspond to best energy standards (nZEB, Passive House), while cost-optimality needs to be considered (EPBD). In these high performance residential buildings, the domestic hot water demand (DHW) has a high to very high contribution (Gustafsson et al. (2014), De Conick et al. (2013)). The useful energy is

in the range of 5.8 kWh/day for a typical apartment with a family with two children acc. to EN 16147 (tapping profile M). Several studies (e.g. Schnieders et al (2002), Lutz et al. (2002) show that a design value of 25 l/P/day 60 °C (energy equivalent) of useful energy for DHW is a good guess if no better information is available.

While it is possible to predict, with good approximation to reality, the average DHW consumption for a typical apartment with a certain number of persons over the course of the year, a prediction of the specific behavior is hardly feasible usually and also not required. Standard profiles (such e.g. as acc. to EN 16147 profile M or L) are usually used to dimension or test equipment and to predict the performance and comfort of DHW preparation systems. However, it is harder to predict peak powers in particular for a whole residential building. Typically, simultaneity factors (e.g. according to Recknagel-Sprenger) are used. However, in order to be on the safe side, the DHW preparation system is usually oversized. With increasing energetic quality of buildings (i.e. nZEBs, EPBD 2010), the energy demand for DHW is the dominating one.

DHW PREPARATION IN MFB

Decentral and Semi-Decentral

Designing cost optimal efficient DHW systems that allow to provide a high level of comfort is not trivial. Building and HVAC simulation can help to improve the system design, to find appropriate dimensioning of the components, to improve control strategies and set points, to assist in commissioning the system and finally to detect and fix faults.

In order to meet the requirements of high DHW comfort and high thermal performance as well as addressing hygienic concerns (i.e. Legionella), different decentral heating systems for MFBs were proposed and tested recently. In particular in combination with heat pumps (HP), decentral DHW preparation with fresh water stations (FWS) can be advantageous as it allows to reduce the flow temperature compared to a classical circulation system. Fresh water stations can be combined with

- 2-pipe system (i.e. combined heating and DHW distribution with high flow temperature)
- 3-pipe system (i.e. separate heating and DHW distribution with common return flow or
- 2+2-pipe system (i.e. separate heating and DHW distribution)

In case of the 2-pipe system, in order to reduce the flow temperature, there exist combinations with

- decentral booster (flow type post heater or HP)
- return flow heat pump (RF-HP) in combination with floor heating (Ochs et al. (2014b))
- decentral DHW stores and so-called charging window(s)

Decentral flow type electric (post) heater can be an interesting solution to increase overall system performance and/or to fulfill different comfort needs and account for different economic restrictions.

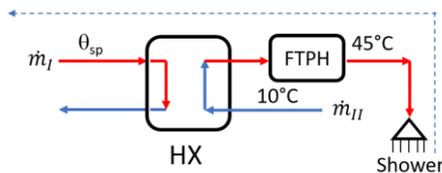


Figure 1: Decentral DHW preparation via freshwater heat exchanger (HX) and flow type post heater (FTPH)

Alternative purely decentral DHW preparation systems are Electro-boiler (EB) or so-called boiler heat pumps (using room air, extract air or ambient air as source), see Dermentzis et al (2018), but these have generally lower efficiencies. All these systems can be combined with shower drain water recovery (SDWR), see e.g. Wong (2010). The maximum possible overall primary energy savings compared to e.g. a standard 4 pipe circulation system (4P-C) depend significantly on the type of system used and the distribution losses. In addition to efficiency and performance aspects (i.e. reduction of distribution losses vs. overall system performance), the following aspects should be considered:

- Reduced investment cost
- Ease of installation (in particular in case of retrofit)
- Billing (combined DHW and electricity bill)
- Maintenance (outsourcing to tenant ...)
- Individual comfort (e.g. different set points, switch off during longer absence)
- Space requirements
- Option of cooling (central/decentral), which will be increasingly requested.

Examples and Demo Buildings

Three different demo projects were exemplarily investigated. One consists of two multi-story buildings with altogether 26 flats (see Ochs et al. (2014) and Ochs et al. (2019) for details), each equipped with

decentral fresh water stations and a 2 + 2 pipe system as shown on Figure 2.

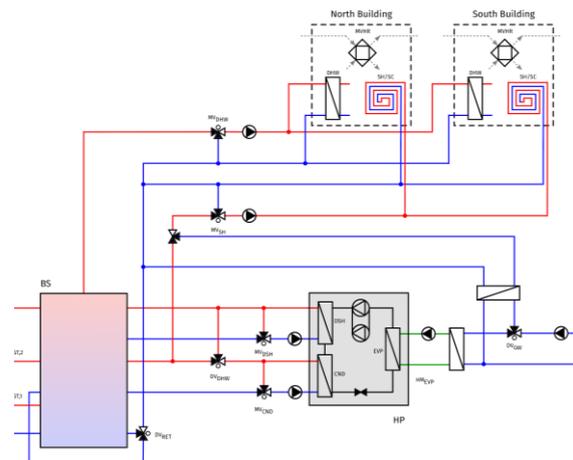


Figure 2: Hydraulic Scheme of the 2+2 pipe system with decentral freshwater preparation

The second building is a rather large residential building with 11 stories and 96 apartments. It will be built in the neighborhood Campagne in Innsbruck (Dermentzis et al. (2019)). The area will consist of 1100 apartments divided in four sections which each four buildings (see Figure 3). The third one is a small 4 story building in Ludwigsburg, Germany, which was renovated to Passive House standard within the EU project iNSPiRe (fp7) and equipped with a 2 pipe system with decentral fresh water stations and flow type post heaters.

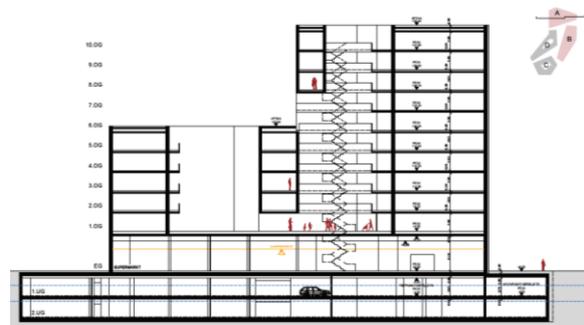


Figure 3: Building A of block 1 of Campagne Areal (source: "bogenfeld ARCHITEKTUR")

RESEARCH QUESTIONS

The overall performance, i.e. the primary energy consumption and/or CO₂-emissions savings should be determined with respect to a reference system (e.g. central 4-pipe circulation). Furthermore, the annual capitalized cost (investment and operation) need to be determined.

For all the above-mentioned systems, the difficulty is to model the different scales (apartment, building, HVAC system) at different design stages (pre-design, design (tender), commissioning) appropriately. DHW comfort (i.e. delay times) can be modelled only on the level of the apartment, while the energy performance

(distribution and storage losses, efficiency of HVAC system) can only be investigated on building level.

Hence, a techno-economic analysis is required and the following general research questions can be formulated:

- What are the distribution losses depending on return temperature for each system?
- Can DHW comfort be guaranteed?
- What is the performance (of a central HP) depending on the load and the return temperature?
- How is the peak power (grid load) influenced?
- Can the power of the central HP be reduced, e.g. in case of limited source and or to reduce sound emissions?
- How is the PV self-consumption influenced?

For planners and other practitioners, it is important to show how good the performance can be predicted with simplified tools such as PHPP or energy certificate calculation (monthly balance). In this paper specifically the first two questions are answered with the focus on the 2-pipe-system with FTPH.

METHODS

This contribution focus on the sizing of the system, the DHW comfort and on the prediction of energy performance using different methods. Evaluation and comparison of the different systems requires considering the full range, from apartment level to district level as summarized in Table 1 and illustrated in Figure 4.

Table 1: Matrix of combinations of heat supply, heating system, heat distribution and pipe insulation level

Heat supply system	Heating system per ...	Pipe distribution system	Insulation level
heat pump (HP)	building	4P-C	Moderate
district heating (DH)	block	2+2P-FWS	Good
HP & DH	district	2P-FWS	very good
		2P-RFHP	
		2P-EB	

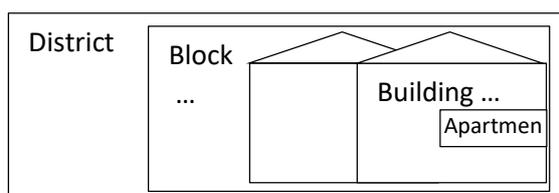


Figure 4: System Boundary from apartment to district

Daily performances with different DHW profiles are evaluated, focusing on the one hand on the dynamic response of the system in order to achieve the request of the user (such as the delay time to reach the desired temperature). On the other hand, the return temperature to the storage, the thermal losses and the energy expense are evaluated.

Reference Buildings and Building Models

A typical medium size residential multi-story building with 5 stories and 10 apartments is used as virtual case study. This type of building represents a large number of multifamily buildings typically build in central Europe in the 50ies and 60ies. Different models of the small multi-family house were developed in Matlab Simulink using the Carnot Toolbox and the building model CarnotUIBK.

Modelling approaches

In order to model the influence on district level, simplified building models are required, contrariwise, in order to evaluate in detail, the dynamics of the decentral DHW-HX detailed apartment-wise models are required.

In this contribution different approaches for modelling innovative decentral DHW preparation systems are investigated and the results are compared to each other. The reference case is the single apartment. The apartment could be simulated in the building with all the distribution pipes to account for the thermal losses and to predict her energy performance. However, the return temperature would never be realistic. For the entire building, if all apartments would be simulated together, different profiles need to be generated in order to account for different times of use and an accordingly for “smoothed” power profiles (simultaneity of DHW use). For very large buildings with more than 10 and up to 100 apartments such an approach would lead to a very heavy simulation model with extensive simulation times. Contrariwise, a lumped model with one heat exchanger would be easy to use but could not predict the dynamics and the return flow temperature correctly. However, if an appropriate DHW profile could be generated for variable number of apartments e.g. by DHWcalc (see below) such an approach would be feasible for energy performance prediction. However, an appropriate model for the heat exchanger and a valid parameterization needs to be found. In the following table the different modelling approaches are summarized:

Table 2: Matrix of modelling approaches

Zoning	Approaches		
	Single Zone	Multi Zone	
Distribution pipes	Physical	Simplified	
Heat emission system	Physical	Simplified	Lumped
DHW HX	Physical (1/apartment)	Lumped (1/thermal zone)	
DHW tapping profile	Statistical	Standard	Lumped

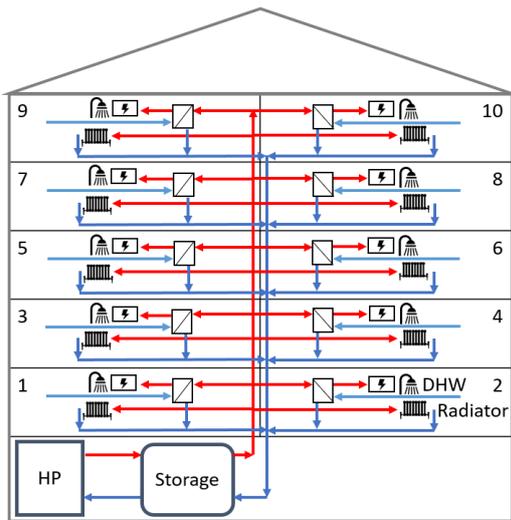


Figure 5: Reference Building with 10 zones and decentral DHW-HX and flow type post heater (FTPH)

DHW profiles

A standard profile (M, EN 16147) and a profile derived by DHWcalc (Jordan (2000)) were considered for a single apartment model in order to create a reference case to compare the simulations with. In the single apartment model, a typical 26 kW heat exchanger is used in order to provide the DHW. Five different DHW profiles were created for the whole building. Four were based on the profile M acc. to EN 16147, while one profile was created with the help of the tool DHWcalc. The different DHW profiles are presented in Figure 6. Individual means here 10 different statistical profiles generated with DHWcalc, one for each apartment; building means one profile for 10 apartments.

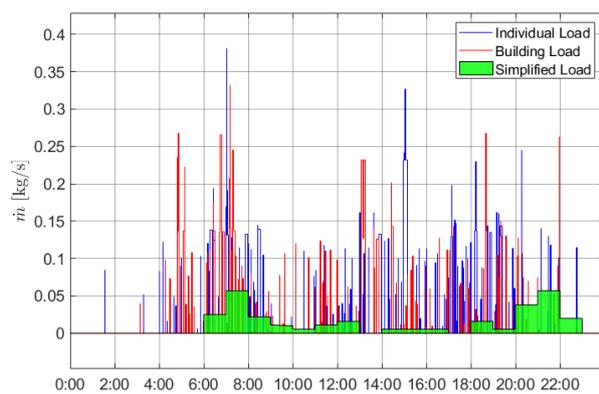


Figure 6: Statistical DHW profiles (DHWcalc) and simplified DHW profile - one day profile

Zoning

In a modelling approach, which is close to reality (“physical” model), the reference building would be split into 10 thermal zones with 10 radiators and 10

DHW HX, one in each thermal zone. All DHW HX are connected in parallel and influence the return flow temperature, see Figure 5. There is a central storage and heat pump and they might be placed inside or outside of the thermal envelope. This approach is possible for 10 apartments (i.e. 10 thermal zones), but for very large buildings (such as e.g. the Campagne neighbourhood, see Figure 3) the modelling effort is enormous and such an approach seems not to be practicable. By reducing the thermal zones to one lumped thermal zone, which represents the thermal envelope of the building, the modelling effort and the simulation duration can be massively reduced. Still, the distribution pipes are arranged in a realistic, i.e. physical correct way (Figure 7) and each of the apartments has its own radiator, DHW HX and optionally FTPH (Figure 8). This model is called “Semi-Physical” model.

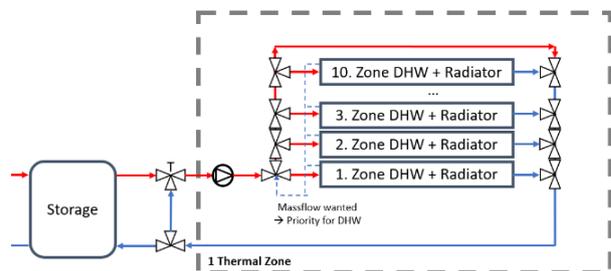


Figure 7: Model of the thermal zone and the decentral DHW HX, “Semi-Physical” approach with one thermal zone and 10 radiators and 10 DHW HX

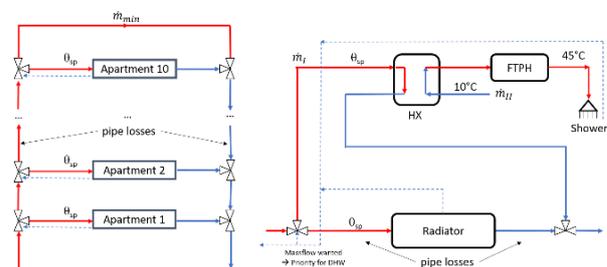


Figure 8: Model of the pipe distribution (left) and of the apartment “Semi-Physical” approach

In order to further simplify the model and reduce the simulation time, one lumped radiator can be used instead of 10 single ones and all the distribution pipes can be placed in series (see pipe losses and single radiator in Figure 9). This approach is called the *Star* configuration.

The *Semi Physical* - and *Star Model* are simulated with the *Individual Load* (see Figure 6). Finally, the DHW HX and the FTPH can be also reduced to one lumped subsystem (abbreviated with DHW in Figure 10). This lumped model is called the *1 Zone Model* and is simulated with the *Simplified*-, *Building*-, and *Individual Load* (see Figure 6). The *1 Zone Model* is comparable to the PHPP but is a dynamic simulation instead of a monthly based energy balance calculation.

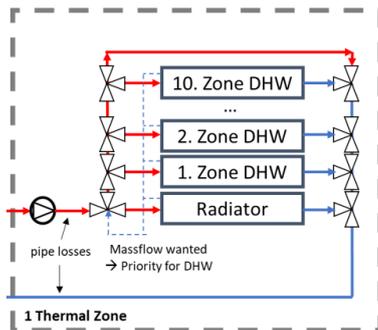


Figure 9: Model of Zoning "Star Model"

For all the previously mentioned models the flow temperature is controlled by a mixer, which is placed right after the storage and it is controlled to be higher as the set point temperature (ϑ_{sp}) depending on the minimum mass flow and insulation level.

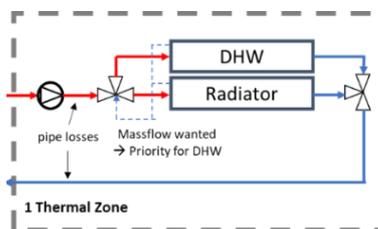


Figure 10: Lumped Model "1 Zone Model"

The chosen DHW demand (DHW) and the climate data (site Innsbruck, Meteonorm 2005) is for all the different modelling approaches the same. PHPP evaluates the heating demand (HD) on monthly basis depending on the climate data. The dynamic models use the same climate data in hourly resolution. In the dynamic model the mass flow of the radiator is controlled depending on the room temperature. In contrast to the evaluation in PHPP the distribution losses of the pipes, which are inside the thermal envelope, are considered as gains, too. For better comparison this is considered in a post-processing step in PHPP, later called PHPP mod*.

Hydraulic Modelling in Simulink

Implementing the pipe losses in Simulink requires connecting several pipes, mixers and diverters. The Carnot Toolbox offers models for thermal and hydraulic modelling. In the *Semi-Physical Model* the pipes, mixers and diverters were modelled such that the distribution pipework was depicted in a realistic way, resulting a large number of differential equations Simulink has to evaluate. In the *Star Configuration* all the pipe losses were lumped and placed in front of all the users (DHW and radiator). As there are no models available that split the mass flow into multiple branches, the number of differential equations could not be significantly reduced, resulting in comparable simulation time. Only with the 1Zone model with lumped heat exchanger a significant simplification was possible. Note that here only results of a thermal simulation are reported, mass flow and pressure drops calculation is possible but was not considered here for sake of simplicity.

Heat Exchanger Model and Parametrisation

The lumped heat exchanger (for the 1-Zone model) and the real heat exchanger (for the apartment) are designed to fulfil following conditions:

Table 3: Heat Exchanger Inlet and Outlet Temperatures for different set points

$\vartheta_{ii} / [^{\circ}\text{C}]$	$\vartheta_{io} / [^{\circ}\text{C}]$	$\vartheta_{Iii} / [^{\circ}\text{C}]$	$\vartheta_{Iio} / [^{\circ}\text{C}]$
40	20.0	10	35.0
45	21.7	10	39.2
50	23.4	10	43.3

Here I and II indicate primary or secondary, and i is inlet and o outlet. The reference secondary mass flow for the lumped heat exchanger is 0.4 kg/s , for the decentral heat exchanger it is 0.25 kg/s in accordance to the DHW profile (see above). The primary mass flow is proportionally increased by the factor 1.25. The power of the heat exchangers, the heat transfer coefficient and the thermal capacity are shown in the following table.

Table 4: Heat Exchanger Parameters, single HX for apartment, lumped HX for 1-Zone Model

	Single HX	Lumped HX
Power $\dot{Q} / [\text{kW}]$	26.2	41.9
heat transfer capability $UA / [\text{W/K}]$	3640	5803
Heat Capacity $C / [\text{J/K}]$	1302	11500

Sensitivity Analysis and Model Parameters

We consider four heat pump qualities based on the Carnot coefficient of performance (COP) and the Carnot performance factor with $\text{COP} = \eta_c \cdot \text{COP}_c$:

- Moderate ($\eta_c = 0.25$)
- Good ($\eta_c = 0.3$)
- Better ($\eta_c = 0.35$)
- Best ($\eta_c = 0.4$)

Furthermore, we consider four insulation levels (i.e. qualities) of the distribution pipes

- Very good (DN2)
- Good (DN1.5)
- Moderate (DN1)
- Poor (DN0.5)

Here *very good* means the insulation thickness is 2 times the dimension of the pipe (diameter nominal DN). *good* refers to 1.5 times DN, *moderate* to 1 times DN and *poor* to 0.5 times DN. The heat loss coefficient for the distribution pipes was calculated in PHPP. It is remarkable to note that thermal bridges are assumed to be included in this effective insulation level. To guarantee the comparability of the different models the reference point to evaluate the controlled flow temperature at the mixer is the temperature at the inlet of the 10th apartment in the *Semi Physical Model*. As a result of this assumption, the flow temperature for the other apartments is slightly higher, which is assumed to be realistic.

RESULTS

Figure 11: Sum of electric energy demand compared to the temperature rise of the FTPH, depending on the setpoint temperature of the DHW, PHPP calculation results reports the results of the total electric energy (central heat Pump + FTPH) for different heat pump qualities (Moderate to Best), pipe insulation levels (poor to very good) and as a function of the flow type post heater temperature difference. Different DHW set point temperatures (secondary side: 45 °C, 50 °C, 55 °C and 60 °C) and heat pump qualities were considered; here the results are reported for the set point of 45 °C and the best heat pump.

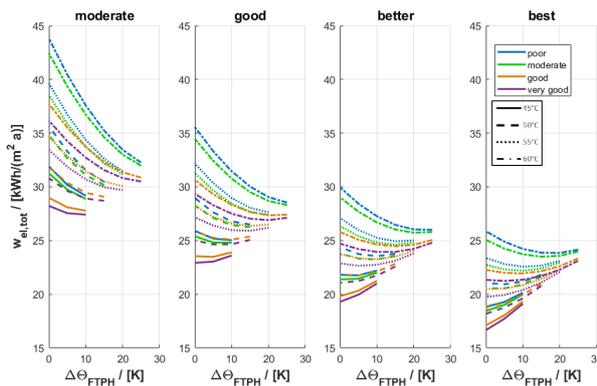


Figure 11: Sum of electric energy demand compared to the temperature rise of the FTPH, depending on the setpoint temperature of the DHW, PHPP calculation results

For poor performing heat pumps and low level of pipe insulation (i.e. high distribution losses) there is an optimum in the range for the operation of a FTPH. However, for good performing heat pumps and good pipe quality, the use of a FTPH increases total electricity consumption. Figure 12 shows the sum of the electric energy demand compared to the temperature rise of the FTPH for the three different dynamic models using the Individual Load and the results from PHPP (Best Heat pump). The following tables show the results of an annual simulation of each previously described model also in comparison to the results from the PHPP. In the Table 5 to Table 7 DHW is the useful domestic hot water demand, HD is the heating demand acc. to PHPP for three different set point temperatures (35 °C, 40 °C and 45 °C). The tables report the useful energy for heating and DHW as well as the contributions of the central heat pump and the flow type post heater to the total required electricity.

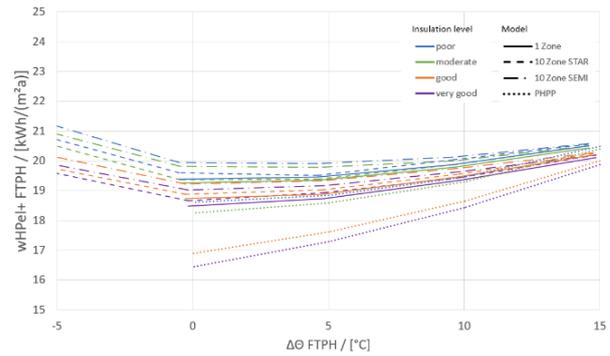


Figure 12: Sum of electric energy demand compared to the temperature rise of the FTPH, dynamic model results

DH is the delivered heat in the simulation models as the sum of the delivered radiator energy, $HP W_{el}$ is the required electric energy by the heat pump. PHPP mod* indicates the modified case of the PHPP, which allows to compare it directly with the dynamic model.

Table 5: summary of annual simulation results, for the case with “poor” insulation (DN 05) and set point temperature of $\vartheta_{SP} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$

	PHPP		1 Zone			10 Zone	
	mod*	Simplified	Building	Individual	Star	Semi	
DHW / [kWh/(m²a)]	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7
HD / [kWh/(m²a)]	23.3	23.3	-	-	-	-	-
DH / [kWh/(m²a)]	-	-	20.9	20.9	20.9	20.9	22.4
HP Q / [kWh/(m²a)]	54.7	42.1	40.9	39.8	39.8	40.1	40.7
HP W_{el} / [kWh/(m²a)]	13.3	12.7	12.8	12.4	12.4	12.5	12.6
FTPH W_{el} /	6.2	6.2	6.2	7.5	7.5	7.5	7.5
Storage loss /	0.25	0.25	0.29	0.29	0.29	0.29	0.28
Pipe loss /	5.8	5.8	4.7	4.7	4.7	5.0	4.2
Average ϑ_{return} / [°C]	33.1	33.1	32.7	33.1	33.1	33.0	33.0

Table 6: summary of annual simulation results, for the case with “poor” insulation (DN 05) and set point temperature of $\vartheta_{SP} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

	PHPP		1 Zone			10 Zone	
	mod*	Simplified	Building	Individual	Star	Semi	
DHW / [kWh/(m²a)]	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7
HD / [kWh/(m²a)]	23.3	23.3	-	-	-	-	-
DH / [kWh/(m²a)]	-	-	20.2	20.2	20.2	20.0	22.4
HP Q / [kWh/(m²a)]	57.0	46.1	44.7	43.3	43.3	43.5	44.8
HP W_{el} / [kWh/(m²a)]	15.7	15.5	15.2	14.7	15.1	14.7	15.1
FTPH W_{el} /	3.1	3.1	3.3	4.7	4.8	4.8	4.8
Storage loss /	0.30	0.30	0.34	0.34	0.34	0.34	0.33
Pipe loss /	7.5	7.5	6.0	6.1	6.1	6.5	5.4
Average ϑ_{return} / [°C]	37.5	37.5	36.9	37.5	37.5	37.4	37.3

Table 7: summary of annual simulation results, for the case with “poor” insulation (DN 05) and set point temperature of $\vartheta_{SP} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$

	PHPP		1 Zone			10 Zone	
	mod*	Simplified	Building	Individual	Star	Semi	
DHW / [kWh/(m²a)]	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7
HD / [kWh/(m²a)]	23.3	23.3	-	-	-	-	-
DH / [kWh/(m²a)]	-	-	19.7	19.7	19.6	19.5	22.5
HP Q / [kWh/(m²a)]	59.3	50.1	48.8	47.2	47.1	47.5	48.9
HP W_{el} / [kWh/(m²a)]	18.6	18.5	18.1	17.5	17.4	17.6	18.0
FTPH W_{el} /	0	0.0	0.2	1.9	1.9	2.0	1.9
Storage loss /	0.35	0.35	0.39	0.38	0.38	0.39	0.38
Pipe loss /	9.2	9.2	7.3	7.4	7.4	7.9	6.5
Average ϑ_{return} / [°C]	41.9	41.9	41.3	42.0	42.0	41.8	41.8

In Figure 14, the pipe losses are shown for the different distribution systems, depending on the insulation level and set point temperature. The *1 Zone Model* is simulated with the *Individual Load*. For higher set point temperatures and poor or moderate insulation level deviations between the models are significant. Figure 13 shows the return flow temperature to the corresponding mass flow. The dashed line in the temperature subplot is the set point temperature, the dashed line in the mass flow subplot represents the minimum mass flow which is always circulating through the distribution pipes.

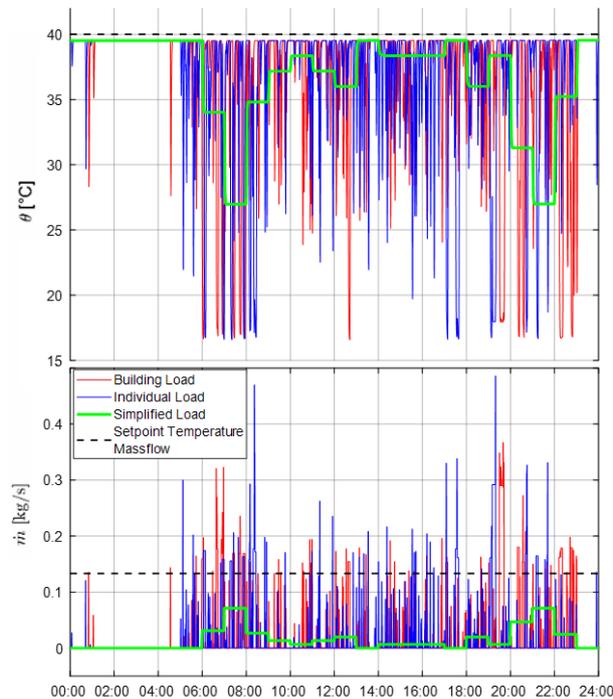


Figure 13: Return flow temperature of “1 Zone Model” over a day depending on the chosen DHW load

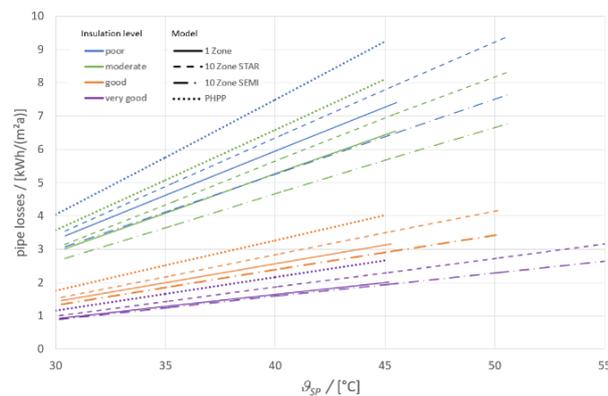


Figure 14: Pipe losses depending on distribution, insulation level and set point Temperature (ϑ_{sp})

DISCUSSION

A design and evaluation tool for HVAC systems for multifamily buildings should consider the details (apartment level) as well as the influence on district level (district heating, energy mix). A (close-to) physical model is often not feasible because of the extensive simulation times. With such a model a multi-objective optimization is hardly possible. A “lumped” model - even after careful parameterization, cannot predict the dynamic behavior accurately, but the general trends can be well projected.

The simulation time can be significantly decreased. Compared to the *Semi Physical Model* the simulation duration of the *Star Configuration* was 98%, whereas the *1 Zone Model* only took approx. 20%. The annual simulation time also depends on the chosen DHW tapping profile. The arrangement of the distribution pipes should be as realistic as possible. The pipe losses of the *Semi-Physical Model* were compared with those of the simplified models. The influence of the distribution pipes is obviously decreasing with better insulation and increasing with higher flow temperatures (Figure 14).

The PHPP and the simplified dynamic models overestimate the thermal losses of the distribution system compared to the semi-physical model (see Table 5 to Table 7). The choice of the DHW tapping profile and the size and the characteristics of the “lumped” heat exchanger for the entire building influences not only the thermal behavior of the heat exchanger, but also the return temperature to the storage and accordingly the distribution losses and the stratification. The latter is critical for the performance of the HVAC system in particular in case of a heat pump. As can be seen in Figure 13, the peaks in the return temperature are influenced significantly by the choice of the DHW profile, in particular in case of the simplified profile. However, the deviation of the average return temperature, which is relevant for the prediction of the losses, is relatively small. The overall performance of the central heat pump, the distribution losses and of the flow type post heater electricity demand depend significantly on the set point temperature, but because of the presence of the buffer store the performance of the HP is not influenced by the return temperature. For the case with the “very good” heat pump the optimal performance is obtained without operation of post-heating, i.e. with a set point temperature high enough to fulfil the DHW comfort requirements. However, for poorer performing heat pumps and low level of pipe insulation quality (or large distribution networks) the use of FTPH can be beneficial. PHPP seems to slightly underestimate the electric energy demand compared to the dynamic simulation models. This because of dynamic effects (inertia of the heat exchanger). However, the trend is predicted correctly. Overall, the better the insulation level is, the smaller is the difference between the different models (see also Figure 14).

CONCLUSIONS AND OUTLOOK

In this contribution different approaches to model and investigate the influence of decentral DHW preparation systems were investigated and compared. Sizing of the system, the DHW comfort and the prediction of energy performance using different methods are discussed. Energy performances with the different statistical and simplified daily DHW profiles are evaluated, focusing on the one hand on the dynamic response of the system in order to achieve the request of the user (such as the delay time to reach the desired temperature). On the other hand, the return temperature to the storage, the thermal losses and the energy expense are evaluated. It is demonstrated that with simplified approaches, i.e. 1-Zone model and PHPP, the general trends can be predicted, but careful parameterization is required. PHPP delivers good predictions with respect to the general trend, but only with a dynamic model the real PH consumption can be predicted well. The results can be the basis for future work in order to develop algorithms for design tools (e.g. Energy Certificate, PHPP) for investigating, dimensioning and optimizing innovative DHW system for multi-family buildings. In a future work, also a full physical model (i.e. with 10 thermal zones) should be developed and results should be compared with those of the simplified approaches. The investigation of different user behavior (such as different heating and DHW set points or times with absence) should be included in the investigation. In addition to the existing models, a hydraulic calculation which includes pressure drops etc. should be included in the future to include the electric power consumption of the pumps. Furthermore, a techno-economic evaluation of the different concepts including the return flow heat pump is required. Detailed hydraulic calculation including pump control should be further investigated.

ACKNOWLEDGEMENT

This publication is part of the Austrian research project “Smart City Campagne-Areal Innsbruck”. This project is financed by the Austrian “Klima- und Energiefonds” and performed in the frame of the program “Smart Cities Demo 2016”. The authors highly appreciate the support and cooperation of the companies IIG, NHT, IKB and Klimatherm. Special thanks goes to Vaillant for the support to the study on the flow-type post heater.

REFERENCES

De Coninck R., Baetens R., Saelens D., Woyte A., Helsen L., Rule-based demand-side management of domestic hot water production with heat pumps in zero energy neighbourhoods, Pages 271-288 | Received 05 Feb 2013, Accepted 29 Apr 2013, Published online: 14 Jun 2013

- Dermentzis G., Ochs F., Ksiezzyk A., Venturi E., Magni M., Gstrein H. Heating with PV Façade in a Passive House, 13th Conference on Advanced Building Skins, Bern, Switzerland, Oct. 1-2, 2018 - website: abs.green October 2018 - PDF 1.19MB
- Dermentzis, G., Ochs, F., Thuer, A., 2019. Primary-energy Based Optimization of a New Building District through Simulations on Flat, Building, Block and District Level, in: IBPSA (Ed.), 16th IBPSA Conference Rome, Italy, Sept. 2-4, 2019. pp. 3628–3635. <https://doi.org/https://doi.org/10.26868/25222708.2019.210919>
- Gustafsson M., Dermentzis G., J. Are Myhren, Bales C., Ochs F., Holmberg S., Feist W., Energy performance comparison of three innovative HVAC systems for renovation through dynamic simulation, Energy and Buildings, Volume 82, October 2014, Pages 512-519
- Jordan U., Vajen K., Influence of the DHW-profile on the Fractional Energy Savings – A Case Study of a Solar Combisystem, in: CD-ROM of the Third ISES Europe Solar Congress EuroSun00, Copenhagen, Denmark, 2000
- Lutz J. D. , Klein G., Springer D., Residential hot water distribution systems: Roundtable session, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2002
- Ochs F., Dermentzis G., Feist W., Minimization of the residual energy demand of multi-storey passive houses–energetic and economic analysis of solar thermal and PV in combination with a heat pump, Energy Procedia, Volume 48, 2014, Pages 1124-1133
- Ochs F., Dermentzis G., Monteleone W., Simulation-assisted Optimization of the HVAC system of NZE Multi-family Buildings, “Proceedings of Building Simulation 2019: 16th Conference of IBPSA” (ISBN: 978-1-7750520-1-2)
- Ochs F., Krimbacher P., Siegele D., Feist W., Niedertemperaturheizung in Kombination mit einer dezentralen Boiler-Wärmepumpe, Bausim 2014 ibpsa.org
- Recknagel - Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 77. Ausgabe 2015/16: Basisversion Print Taschenbuch – 17. November 2014
- Schnieders J., Hermelink A., CEPHEUS results: measurements and occupants’ satisfaction provide evidence for Passive Houses being an option for sustainable building, Energy Policy, Volume 34, Issue 2, January 2006, Pages 151-171
- Wong L.T., Mui K.W., Guan Y., Shower water heat recovery in high-rise residential buildings of Hong Kong, Applied Energy, Volume 87, Issue 2, February 2010, Pages 703-709

IV: Betriebsoptimierung

ENTWICKLUNG UND IMPLEMENTIERUNG VON BETRIEBSFÜHRUNGSSTRATEGIEN IN EINEM PLUSENERGIEGEBÄUDE

C. Betzold¹, A. Dentel¹ und S. Bordin¹

¹Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, Nürnberg, Deutschland

KURZFASSUNG

Der steigende Einsatz erneuerbarer Energien im Wohnungsbau erfordert intelligente Lösungen, um die lokal erzeugte Energie vor Ort nutzen zu können. Das Ziel dieser Forschungsarbeit ist es, optimierte Betriebsführungsstrategien für modulierende Wärmepumpen (MWP) mit Speichern zu entwickeln und diese in einem Plusenergie-Reihenhauskomplex anzuwenden, um den Eigenverbrauch der Photovoltaikerzeugung (PV) und die Effizienz zu erhöhen. Der Betrieb und der Vergleich zweier optimierter Betriebsführungsstrategien zeigen, dass beide einen ähnlich hohen PV-Eigenverbrauch erzielen, aber zu unterschiedlichen Arbeitszahlen führen.

ABSTRACT

The increasing use of renewable energies in residential buildings requires intelligent solutions in order to be able to use the locally generated energy on site. The aim of this research is the development and the real application of optimized control strategies for modulating heat pumps (MHPs) with thermal storage tanks in plus energy terraced houses, built in 2017. The optimized control strategies aim an increase of PV self-consumption and efficiency. The operation and comparison of two optimized control strategies show, that both reach the same PV self-consumption but different seasonal performance factors.

EINLEITUNG

Seitdem die Einspeisvergütung sinkt und der Strompreis der Energieversorger steigt, wird der PV-Eigenverbrauch aus wirtschaftlicher Sicht der Hausbesitzer interessant. Intelligente Steuerungen, die die Kombination aus PV-Anlage, Wärmepumpe und thermischem Speicher nutzen, bieten das Potential Betriebskosten zu reduzieren, indem gezielt PV-Überschuss in Form von Wärme zwischengespeichert wird. Battaglia, M. et al. (2017) zeigt, wie Steuerungsstrategien Stromkosten durch Überhitzen des thermischen Speichers reduzieren können. Des Weiteren untersucht Psimopoulos, E. et al. (2016) Steuerungsalgorithmen und deren Beitrag zur Endenergie, solaren Anteilen, Eigenverbrauch und Arbeitszahlen in der Software TRNSYS. Die

Ergebnisse zeigen eine Erhöhung des PV-Eigenverbrauchs auf 50,5 % beim Einsatz von Steuerungsstrategien in Kombination mit thermischen und elektrischen Speichern, wenn von einem Standardfall ohne Batterie und wärmegeführten MWP Betrieb ausgegangen wird.

Ein hohes Potential wird von der modellprädiktiven Regelung (model predictive control (MPC)) erwartet, da diese durch numerische Optimierung unter Berücksichtigung von Wetter- und Lastprognosen einen vorausschauenden Betrieb ermöglicht. In der Forschungsarbeit von Fischer, D. et al. (2017) wird eine MPC-Strategie entwickelt, die den jährlichen PV-Eigenverbrauch in einem Mehrfamilienhaus um bis zu 5 % erhöht und die Energiekosten um maximal 16 % bei variablen Strompreisen reduziert. Pichler, M. et al. (2017) zeigt in einer Jahressimulation, dass durch die gezielte MPC-Regelung einer Wärmepumpe der PV-Direktverbrauch in einem Einfamilienhaus um 30 % gesteigert werden kann. In realer Anwendung einer MPC ist es wichtig, dass neben der Evaluierung der Kostenersparnis auch der Betrieb der Anlage bewertet wird. Unterschiedliche Optimierungsansätze, insbesondere die Wahl der Modelle und Optimierungsalgorithmen, beeinflussen das Betriebsverhalten der Anlage. In Buderus et al. (2018) wird dargestellt, dass verschiedene Optimierungsansätze für den Betrieb einer Wärmepumpe in einem Hardware-in-the-Loop Prüfstand zu ähnlichen Ergebnissen kommen. Unter Verwendung einer realen Preiskurve eines Energieversorgers ergibt sich im Vergleich zu einem wärmegeführten Anlagenbetrieb eine durchschnittliche Einsparung von nur unter 1 % pro Tag.

In einer vorherigen Forschungsarbeit wurde eine Betriebsführungsstrategie, das Demand Side Management System (DMS), für ein Energiesystem in einem Plusenergie-Reihenhauskomplex in TRNSYS (2015) entwickelt und von Dentel, A. & Betzold, C. (2017) beschrieben. Das Energiesystem umfasst eine gemeinsame Anlage, bestehend aus einer PV-Anlage, zwei MWPs mit thermischer Speicherkaskade und einer Batterie. Die Bereitung des Trinkwarmwassers (TWW) befindet sich dezentral in jedem Reihenhaus und umfasst eine TWW-Wärmepumpe (Booster) mit einem 200 Liter TWW-Speicher. Das DMS wurde bei der Implementierung in die Gebäudeautomation an

das reale Energiesystem angepasst und optimiert, sodass die Weiterentwicklung der Regelung (Betzold, C. & Dentel, A. 2019) zu einer PV-optimierten Regelung (PVC) führte. Die PVC steuert zwei MWP, acht Booster sowie eine Batterie und ist seit Oktober 2018 in Betrieb.

Im Rahmen einer Simulationsstudie von Betzold, C. et al. (2021) wurden die PVC und eine MPC in einer Jahressimulation mit zwei wärmegeführten Regelungen verglichen und unter anderem hinsichtlich Gesamtenergieverbrauch und Betriebskosten bewertet. Eine effiziente wärmegeführte Regelung erreicht im Vergleich zur PVC eine Reduzierung der Betriebskosten um weitere 4,9 %, da diese einen geringeren Gesamtenergieverbrauch bei besserer Arbeitszahl bietet. Die MPC erzielt den geringsten Gesamtenergieverbrauch bei bester Arbeitszahl und reduziert die Betriebskosten um weitere 7,1 % im Vergleich zur PVC.

In dieser Forschungsarbeit wird, im Vergleich zur PVC, eine modellprädiktive Betriebsführungsstrategie für das Energiesystem in einem Reihenhaus-Komplex eingesetzt und das Betriebsverhalten der MWP hinsichtlich PV-Eigenverbrauch und Effizienz bewertet. Aufgrund des begrenzten Testzeitraums der MPC werden die Betriebskosten nicht bewertet, da keine übertragbaren Ergebnisse erzielt werden können. Zusätzlich wird der reale Betrieb mit den Ergebnissen aus Simulation und Modellbildung verglichen.

ENERGIESYSTEM UND REGELUNG

Das thermische Energiekonzept (siehe Abbildung 1) umfasst zwei geothermische MWP mit einer Pufferspeichererkaskade als zentrale Komponenten der Betriebsführung.

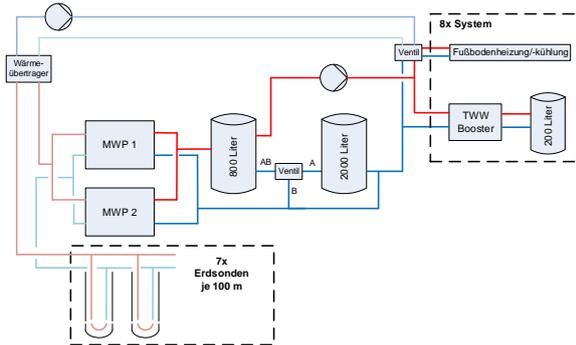


Abbildung 1: Thermisches Energiekonzept mit zentralem Heizungssystem und dezentraler TWW-Erzeugung

Die MWP sollen gezielt in Teillast betrieben werden um eine höhere Leistungszahl (Coefficient of Performance (COP)) zur Effizienzsteigerung der Anlage zu nutzen. Zudem ermöglicht die Flexibilität der MWP eine Anpassung an die thermische Last sowie an die verfügbare PV-Leistung. Zusätzlich

werden acht Booster zur TWW-Bereitung genutzt, um durch deren zeitlich versetzten Betrieb elektrische Lastspitzen zu reduzieren.

PV-optimierte Regelung (PVC)

Die PVC ist eine regelbasierte Regelung, die durch eine Erhöhung des PV-Eigenverbrauchs eine Betriebskostensenkung erreichen soll. Die Wärmepumpen werden gezielt bei PV-Überschuss betrieben und die thermischen Speicher beladen. Eine detaillierte Beschreibung der Regelung sowie der Implementierung ist in Betzold, C. & Dentel, A. (2019) aufgeführt. Zusammengefasst gibt es vier verschiedene Modi:

1. Netzmodus: Die thermischen Speicher und die TWW-Speicher werden auf ein Minimum geladen, um den Komfort sicherzustellen.
2. PV-Modus: Die thermischen Speicher und die TWW-Speicher werden bei PV-Überschuss auf ein Maximum geladen.
3. Lastmanagement: Zur Reduzierung von Lastspitzen werden die Wärmepumpen für 15 Minuten abgeschaltet, wenn eine Lastspitze von 16 kW erreicht wird.
4. Prioritätsmodus: Zur Sicherstellung des Komforts werden bei Unterschreiten einer minimalen Temperatur in den thermischen und den TWW-Speichern die Wärmepumpen wieder angeschaltet. Dieser Modus ist normalerweise an das Lastmanagement gekoppelt.

Die PV-optimierte Regelung ist seit Oktober 2018 für die MWP und seit Januar 2019 für die Booster in Betrieb. In dieser Arbeit wird das Energiesystem in MATLAB als Energiebilanzmodell abgebildet. Die Darstellung des Modells geht aus Gleichungen 1 – 3 hervor.

Modellprädiktive Regelung (MPC)

Die MPC basiert auf einer numerischen Optimierung und auf Wetter- und Lastprognosen. Es wurde ein gemischt-ganzzahliger linearer Optimierungsalgorithmus (MILP) verwendet. Die Erstellung der MPC erfolgte in MATLAB (R2019a) mit der zusätzlichen Software GUROBI (Version 8), um die Option Special Ordered Set (SOS) zu nutzen. Die SOS Option ermöglicht eine Interpolation zwischen Betriebspunkten, damit das Polynom der MWP bei $B5\text{ }^{\circ}\text{C}/W35\text{ }^{\circ}\text{C}$ drehzahlvariabel abgebildet werden kann. So kann die Wärmeleistung der MWP zwischen 4,8 kW und 18,1 kW und die elektrische Leistung entsprechend zwischen 1,0 kW und 4,7 kW liegen. Die Trinkwassererwärmung hat eine Wärmeleistung von 2,2 kW und eine elektrische Leistung von 0,5 kW. Die Abbildung des Energiesystems basiert auf vereinfachten Modellen und wird durch eine Energiebilanz dargestellt.

Die Energiebilanz für das MWP-System ist in Gleichung 1 dargestellt:

$$\sum_{m=1}^2 Q_{MWP,m} + Q_{sp,kap,t-1} = Q_{sp,ver} + Q_{th} \quad (9)$$

Q_{MWP} = Wärmeenergie einer MWP; $Q_{sp,kap,t-1}$ = Wärmespeicherkapazität des vorherigen Zeitschritts; $Q_{sp,ver}$ = füllstandsabhängiger Verlust des Wärmespeichers; Q_{th} = Wärmeenergie des Gebäudes. In Gleichung 2 ist das Booster-System ($n = 1-8$) gezeigt:

$$Q_{B,n} + Q_{sp,T,kap,t-1} = Q_{sp,T,ver} + Q_{th,T,n} \quad (2)$$

Q_B = Wärmeenergie eines Boosters; $Q_{sp,T,kap}$ = Wärmespeicherkapazität des TWW-Speichers des vorherigen Zeitschritts; $Q_{sp,T,ver}$ = konstanter Verlust des TWW-Speichers; $Q_{th,T,n}$ = TWW-Last eines Haushaltes.

Gleichung 3 beschreibt das Batteriesystem:

$$E_{PV} * \eta_{Bat} + C_{Bat,t-1} = \sum_{m=1}^2 E_{MWP,m} + \sum_{n=1}^8 E_{B,n} \quad (3)$$

E_{PV} = PV-Überschuss; η_{Bat} = Wirkungsgrad der Batterie; C_{Bat} = elektrische Speicherkapazität des vorherigen Zeitschritts; E_{MWP} = elektrische Energie einer MWP; E_B = elektrische Energie der Booster.

Betriebsgrenzen werden durch die minimalen und maximalen Speicherkapazitäten sowie durch die vollständige Abdeckung der thermischen und elektrischen Last definiert. Die Kostenfunktion basiert auf Betriebskosten für den Stromverbrauch von Haushalt, MWPs und Booster in Abhängigkeit vom Netz-, PV- oder Batteriebezug sowie auf einem Bonus für die PV-Einspeisung.

In Gleichung 4 ist die Kostenfunktion beschrieben:

$$\begin{aligned} \min J = & \sum_{t=1}^{t_{ende}} E_{el,PV,t} * c_{PV} + \dots \\ & \sum_{t=1}^{t_{ende}} E_{el,Bat,t} * c_{Bat} + \dots \\ & \sum_{t=1}^{t_{ende}} E_{el,Netz,t} * c_{Netz} - \dots \\ & \sum_{t=1}^{t_{ende}} E_{el,Einsp,t} * c_{Einsp} \end{aligned} \quad (4)$$

c = Kosten für Strombezug in Abhängigkeit vom Netz-, PV- oder Batteriebezug sowie der Einspeisevergütung.

Gleichung 5 beschreibt die Summe der elektrischen Energie:

$$E_{el} = E_{el,Haus} + \sum_{n=1}^2 E_{el,MWP,n} + \sum_{n=1}^8 E_{el,B,n} \quad (5)$$

E_{el} = Gesamter elektrischer Verbrauch; $E_{el,Haus}$ = gesamter elektrischer Verbrauch der Haushaltsgeräte.

Zur Erstellung des Betriebsplans der Wärmepumpen werden Prognosedaten über einen Zeitraum von 24 Stunden von einer Wetterprognosestation empfangen. Die Ermittlung der PV-Leistung erfolgt anhand der prognostizierten solaren Einstrahlung und eines physikalischen Modells in MATLAB. Thermische, elektrische und TWW-Lastprognosen werden durch Künstliche Neuronale Netze (KNN) ermittelt. Diese wurden in MATLAB mit der Deep Learning Toolbox erstellt. Das Netz ist ein zweischichtiges Feedforward-Netz mit 20 Neuronen und 20 Layern und wurde mit dem Levenberg-Marquardt-Algorithmus trainiert. Als Trainingsdaten dienten Monitoringdaten über die letzten 12 Monate. Die Eingabewerte zur Erstellung der Lastprognosen sind Außentemperatur, Stunde, solare Einstrahlung auf die Horizontale sowie die Unterscheidung in Wochentag und Arbeitstag. Bisherige Vergleiche von Prognose und Messwerten ergaben moderate Ergebnisse.

BETRIEB DER PV-OPTIMIERTEN REGELUNG

Betrieb und Simulation der PV-optimierten Regelung

Der Betrieb der MWPs wird für eine Woche im Februar 2019 in einer Simulation in einem 15-minütigen Zeitschritt abgebildet. Die Modellierung der Anlagentechnik und die Umsetzung der PVC erfolgen in der Software MATLAB. Für den Betrieb in der Februarwoche werden Monitoringdaten im 15 Minutenintervall verwendet. Die Randbedingungen, thermische und elektrische Lasten sowie Speicherfüllstände, werden aus den Monitoringdaten eingelesen.

In Abbildung 2 ist der Verlauf der thermischen Leistung der zwei MWPs (oben) und der Verlauf des Füllstandes des thermischen Speichers (unten) dargestellt. Im Netzmodus (wärmegeführt) ist ein ähnlicher Verlauf von Messung und Simulation zu erkennen. Im PV-Modus (graue Flächen) gibt es hingegen deutliche Unterschiede in den Betriebszeiten sowie der Wärmeleistung. Die Trägheit des Systems wird in der Simulation nicht abgebildet, da das Modell die Kapazität der MWPs und der Leitungen nicht berücksichtigt. Daher reagiert der Speicherfüllstand

bei Wärmepumpenbetrieb unmittelbar. In Messung und Simulation ist zu erkennen, dass in der betrachteten Woche die Pufferspeicherkaskade bei vollem Speicherfüllstand die thermische Gebäudelast für nur drei Stunden allein decken kann.

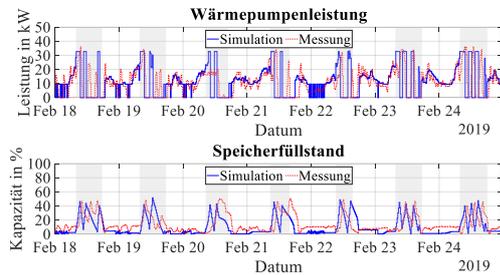


Abbildung 2: Thermische Leistung der MWP (oben) und Speicherfüllstand (unten) im Vergleich von Simulation zu Messung

Betriebsverhalten der MWP

Da das PVC-Modell die Temperaturniveaus nicht berücksichtigt, sollen im Folgenden der Temperaturverlauf im Pufferspeicher sowie die Kondensatorein- und -austrittstemperaturen der MWP1 betrachtet werden. Abbildung 3 (oben) zeigt die vier gemessenen Temperaturen (1 oberste Schicht, 2 unterste Schicht je Pufferspeicher) in der Pufferspeicherkaskade und die gemessenen Kondensatorein- und -austrittstemperaturen der MWP1 (unten) für einen Ausschnitt von 24 Stunden in der betrachteten Februarwoche.

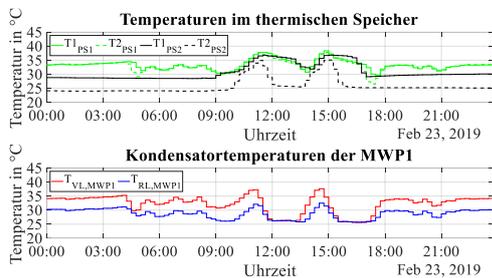


Abbildung 3: Messwerte der Temperaturschichtung der Pufferspeicherkaskade (oben) und Kondensatorein- und -austrittstemperaturen der MWP1 (unten)

Im PV-Modus wird deutlich, dass beide Pufferspeicher beladen werden. Im Allgemeinen folgt der Verlauf der Temperatur in der obersten Speicherschicht des ersten Pufferspeichers ($T_{1,PS1}$) dem Verlauf der Kondensatoraustrittstemperatur ($T_{VL,MWP1}$). Da die Kondensatorspreizung in diesem Ausschnitt konstant bei ca. 5 K liegt, sinkt der Kondensatorvorlauf bei Absinken der Rücklauf-temperatur ab. Folglich wird das Temperaturniveau im ersten Pufferspeicher auch reduziert (siehe Abbildung 3, von 6:00 Uhr bis 9:00 Uhr und ca 21:00 Uhr).

Vergleich von PVC-Simulation und Messung

Zur Bewertung der Simulation werden die Energiebilanzen von Erzeugung und Verbrauch der MWP und Booster den Messwerten gegenübergestellt. Die thermische Entzugsenergie aus den Pufferspeichern sowie die thermische Erzeugung, der elektrische Verbrauch und die Arbeitszahlen der MWP und der Booster sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 zu sehen. Die Speichereinstände werden bei der thermischen Erzeugung berücksichtigt und den Energien als Bonus wieder gutgeschrieben. Die thermische Entzugsenergie setzt sich aus Heizenergie und Quellenenergie der Booster zusammen. Beim Vergleich der gemessenen thermischen Entzugsenergie und Erzeugung wird deutlich, dass die Messgenauigkeit der Messgeräte in die Bilanz einfließt. Die Erzeugung weicht vom thermischen Entzug unter Berücksichtigung des Speicherstart- und -endstandes um -4,4 % ab. Die Abweichungen von Messung und PVC-Simulation sind insgesamt moderat. Die Arbeitszahl der MWP hat eine Abweichung von 6,8 % und die Arbeitszahl der Booster hat eine Abweichung von 2,4 %.

Abbildung 4 zeigt die Energieverteilung der PV-Anlage (oben) sowie des Verbrauchs (unten) im Vergleich von PVC-Simulation zur Messung. Eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten ergibt der Vergleich der Energieverteilung der PV-Anlage. Hingegen sind bei der Energieverteilung des Verbrauchs hinsichtlich der Batterieentladung sowie des Netzbezuges deutliche Abweichungen von -6,8 % und 8,5 % zu erkennen.

Tabelle 1: Vergleich von Erzeugung, Verbrauch und Arbeitszahlen der Wärmepumpen

	PVC	MESSUNG	ABWEICH.
Thermischer Entzug	1955 kWh	1910 kWh	+ 2,4 %
Thermische Erzeugung	1967 kWh	1830 kWh	+ 7,5 %
Elektrischer Verbrauch	417 kWh	421 kWh	- 1,1 %
Arbeitszahl MWP	4.7	4.4	+ 6,8 %

Tabelle 2: Vergleich von Erzeugung, Verbrauch und Arbeitszahlen der Booster

BOOSTER	PVC	MESSUNG	ABWEICH.
Thermische Erzeugung	619 kWh	616 kWh	0,5 %
Elektrischer Verbrauch	148 kWh	149 kWh	- 0.9 %
Arbeitszahl Booster	4.3	4.2	+ 2,4 %

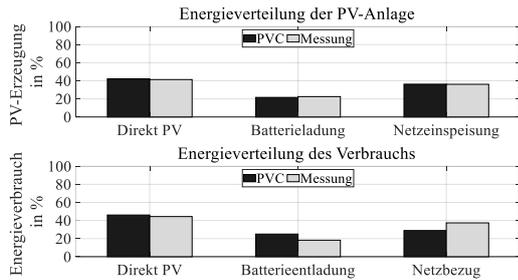


Abbildung 4: Energieverteilung der PV-Anlage (oben) und des Verbrauchs im Gebäude (unten) im Vergleich von Simulation zu Messung

BETRIEB DER MPC-REGELUNG

Der reale Betrieb der MPC erfolgt in Testphasen über mehrere Stunden, um die Ergebnisse der MPC und das Verhalten der Wärmepumpen überwachen zu können. Der gleitende Optimierungshorizont beträgt 23 Stunden mit einer Optimierung im 15 Minutenintervall. Zur Bewertung wird ein Testbetrieb über einen Zeitraum von sieben Stunden analysiert. Dabei werden die MWP's sowie fünf der acht Booster gezielt angesteuert. Aufgrund von nutzerseitigen Einstellungen der Booster können die übrigen drei Booster durch die Gebäudeautomation nicht angesteuert werden.

Vergleich der Prognosedaten

Die Prognosewerte und Ergebnisse des MPC-Betriebs werden abschließend den Monitoringdaten gegenübergestellt. In Abbildung 5 ist die Prognose für die PV-Leistung und die thermische Last, die in der MPC verwendet wird, den Ergebnissen des Monitorings gegenübergestellt. Es gibt abschnittsweise große Abweichungen zur Messung, insbesondere bei der PV-Prognose. Insgesamt wird der Trend der Lasten jedoch ausreichend gut abgebildet.

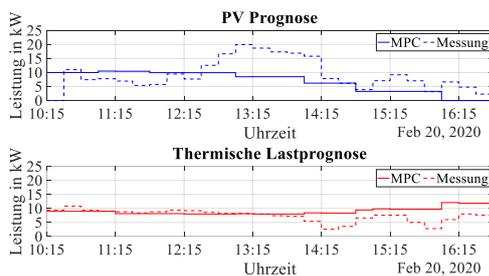


Abbildung 5: Gegenüberstellung von Prognose der PV-Leistung und der thermischen Last mit Monitoringdaten

Der RMSE und NRMSE für die vier Lastprognosen werden in Tabelle 3 dargestellt. Ein hoher RMSE ergibt sich bei der PV-Leistung von 5,6 kW sowie ein NRMSE von 28,1 %, welche insbesondere aus einer abweichenden Solarprognose der Wetterempfangstation resultieren. Die Werte für den RMSE der

Lastprognosen, die auf Grundlage der erstellten KNN ermittelt wurden, liegen zwischen 1,3 kW und 3,0 kW, die Werte für den NRMSE liegen zwischen 22,6 % und 37,1 %. In Tabelle 4 sind die für den Zeitraum resultierenden Summen der Prognosewerte und der Messwerte gegenübergestellt. Die Prognose der TWW-Last weicht in der Summe geringfügig ab (um 2 %). Für die übrigen Prognosen treten deutliche Abweichungen von bis zu 24,6 % auf. Aufgrund der gleitenden Optimierung im 15 Minutenintervall werden die Abweichungen durch die neuen Startbedingungen relativiert.

Tabelle 3: RMSE und NRMSE von Prognose und Messung

	RMSE IN KW	NRMSE IN %
PV- Leistung	5,6	28,1
Thermische Leistung	3,0	37,1
Elektrische Leistung	1,9	27,6
TWW Last	1,3	22,6

Tabelle 4: Vergleich des Energieverbrauchs von Prognose (Prog.) und Messung (Mess.) sowie deren Abweichung (Abweich.)

	PROG. IN KWH	MESS. IN KWH	ABWEICH.
PV-Energie	45,0	59,7	- 24,6 %
Thermische Energie	61,4	50,3	+ 22,1 %
Elektrische Energie	22,5	28,7	- 21,6 %
TWW Last	25,0	24,5	+ 2,0 %

Betrieb und Vorgabe der modellprädiktiven Regelung

Der Betrieb der MWP's erfolgt über das Setzen der Soll-Rücklauftemperatur am Kondensatoreintritt, um die thermische Leistung zu beeinflussen. Ein direktes Einstellen der Kompressordrehzahl ist nicht möglich. Höheres oder niedrigeres Setzen zur aktuellen Rücklauftemperatur führt zu einem Ansteigen oder Absenken der Kompressordrehzahl. In Abbildung 6 ist die thermische und elektrische Leistung der MWP1 und MWP2 abgebildet.

In den ersten vier Stunden liegt die Messung etwas über der MPC-Vorgabe der thermischen Leistung. In den letzten drei Stunden ist die Messung deutlich niedriger als die MPC-Vorgabe. Hier kam es zu Abschaltungen der MWP's durch deren interne Steuerung, da die Soll-Rücklauftemperatur um 2 K überschritten wurde. Dies ist auf eine geringere Entladung als prognostiziert zurückzuführen (siehe Abbildung 5).

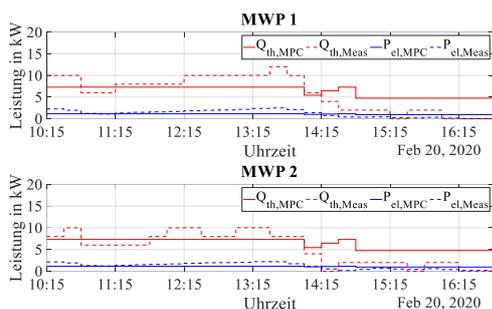


Abbildung 6: Thermische Leistung der MWP1 (oben) und MWP2 (unten) im Vergleich von MPC-Vorgabe zu Messung

Der Speicherfüllstand wird in Abbildung 7 dargestellt. Der durch die MPC im 15 Minutentakt fortlaufend vorgegebene Wert stimmt gut mit der Messung überein (grüne Kurven), insbesondere bei der Beladung. Zusätzlich ist der im ersten Zeitschritt vorhergesagte Fahrplan des Speicherfüllstands abgebildet (schwarze Kurve), der bereits wenig vom Verlauf der tatsächlichen Speicherbe- und -entladung abweicht. Der gute Verlauf der Beladung kommt aufgrund des gezielten Einstellens der thermischen MWP-Leistung und der guten Prognose der Entladeleistung in den ersten vier Stunden zustande. Bei der Entladung (ab 14:45 Uhr) ist die Prognose der Entladeleistung hingegen zu hoch und der Betrieb der MWPs wurde durch die interne Regelung häufig abgeschaltet. Im Folgenden wird daher das Betriebsverhalten der MWPs genauer untersucht.

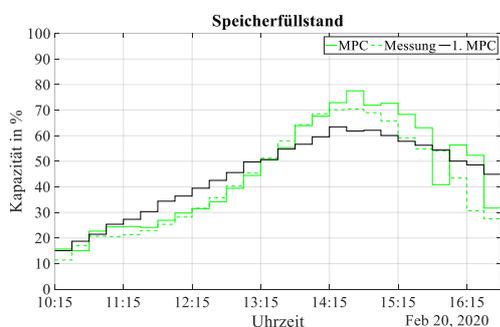


Abbildung 7: Speicherfüllstand im Vergleich von fortlaufender MPC-Vorgabe zu Messung sowie erster Vorgabe der MPC

Betriebsverhalten der MWPs

Da das MPC-Modell auf der Betrachtung eines Energiebilanzmodells beruht und die Temperaturniveaus nicht berücksichtigt, sollen im Folgenden der Temperaturverlauf in der Pufferspeicherkaskade sowie die Kondensatorein- und -austrittstemperaturen betrachtet werden. Abbildung 8 (oben) zeigt die gemessenen Temperaturen in der Pufferspeicherkaskade. Bei Beladung des Pufferspeichers hat die MWP1 eine Kondensatorspreizung von ca. 5 K und es stellt sich eine typische Schichtung der Temperaturen

ein. Bei Entladung der Pufferspeicherkaskade wird die thermische Leistung der MWP1 gesenkt, dabei stellt sich eine kleinere Kondensatorspreizung von 2-3 K ein. Der niedrigere Vorlauf verursacht eine Reduzierung der Speichertemperatur im ersten Pufferspeicher. Zusätzlich zu diesem Verhalten werden die MWPs mehrmals in den letzten Stunden des Testbetriebes durch die interne Regelung ausgeschaltet und durch die MPC-Vorgabe wieder eingeschaltet, was beim Anfahren ebenfalls zu einer Reduzierung der Speichertemperatur führt. Die in Abbildung 7 ersichtliche Entladung des Speicherfüllstands zwischen 15:45 Uhr und 16:30 Uhr ist hauptsächlich auf dieses Verhalten der MWPs zurückzuführen.

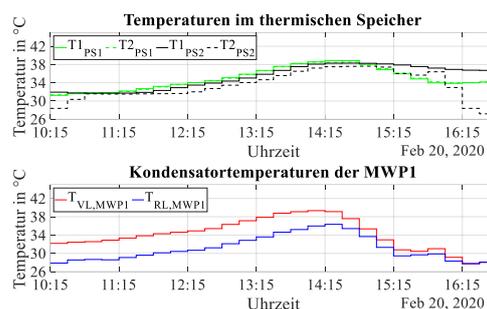


Abbildung 8: Messwerte der Temperaturschichtung der Pufferspeicherkaskade (oben) und Kondensatorein- und -austrittstemperaturen der MWP1 (unten)

Vergleich von MPC-Simulation und Messung

Abbildung 9 zeigt die Energieverteilung der PV-Anlage (oben) sowie des Verbrauchs (unten). Eine gezielte Be- und Entladung der Batterie durch eine MPC-Vorgabe wurde bisher nicht umgesetzt. Es zeigt sich, dass der PV-Eigenverbrauch eine Differenz von -8,9 % und der PV-Autarkiegrad eine Differenz von 2,7 % aufweisen. Die Arbeitszahlen der MWPs (siehe Tabelle 5) unterscheiden sich deutlich. Aufgrund der Ein- und Ausschaltvorgänge ab 14:15 Uhr sowie höherer Kondensatoreintrittstemperaturen im realen Betrieb (Messung) ergibt sich eine schlechtere Arbeitszahl. Die Arbeitszahl der Booster stimmt gut mit der Messung überein.

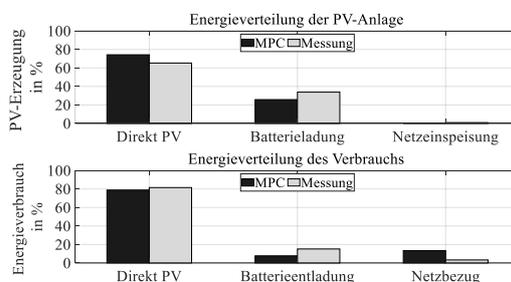


Abbildung 9: Energieverteilung der PV-Anlage (oben) und des Verbrauchs im Gebäude (unten) im Vergleich von Simulation zu Messung

Tabelle 5:
Vergleich der Arbeitszahlen der Wärmepumpen und Booster

ARBEITS-ZAHL	MPC	MESSUNG	AB-WEICHUNG
MWPs	5,9	4,9	+ 20,4 %
Booster	4,3	4,5	- 4,4 %

VERGLEICH DER REGELUNGEN

Betrieb der PV-optimierten und modellprädiktiven Betriebsführungsstrategien

Die Energieverteilung sowie das Betriebsverhalten der MWPs sollen unter Anwendung der PVC und der MPC miteinander verglichen werden. Im Folgenden wird der oben betrachtete Zeitraum von sieben Stunden durch die PVC in der Simulation abgefahren und den Messergebnissen beim MPC-Betrieb gegenübergestellt. In Abbildung 10 wird deutlich, dass die MWPs im PV-Modus eine höhere thermische Leistung bereitstellen und die Pufferspeicherkaskade zügig aufladen. Hingegen werden die MWPs im MPC-Betrieb mit einer niedrigeren thermischen Leistung betrieben, sodass die Pufferspeicherkaskade erst später geladen ist.

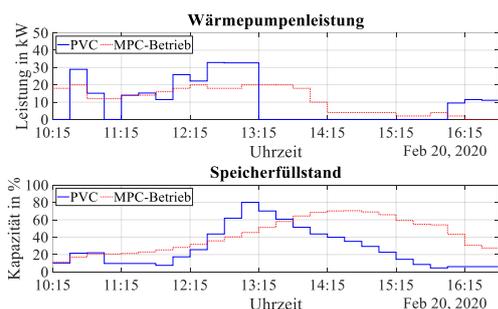


Abbildung 10: Thermische Leistung der MWPs (oben) und Speicherfüllstand (unten) im Vergleich von PVC-Simulation zu MPC-Betrieb

Vergleich von MPC-Betrieb und PVC-Simulation

Abbildung 11 zeigt die Energieverteilung der PV-Anlage (oben) sowie des Verbrauchs (unten). Da die Batterie im MPC-Betrieb nicht aktiv gesteuert wurde, wird im Folgenden nur die PV-Direktnutzung verglichen. Hinsichtlich der PV-Nutzung zeigen sich nur geringe Unterschiede. Der PV-Eigenverbrauch hat eine Differenz von -1,1 % und der PV-Autarkiegrad hat eine Differenz von 3,5 %.

Die Arbeitszahl der MWPs (siehe Tabelle 6) in der PVC-Simulation ist etwas geringer, da die MWPs häufiger im hohen Drehzahlbereich betrieben werden. Die Arbeitszahl der Booster ist der Messung im MPC-Betrieb ähnlich.

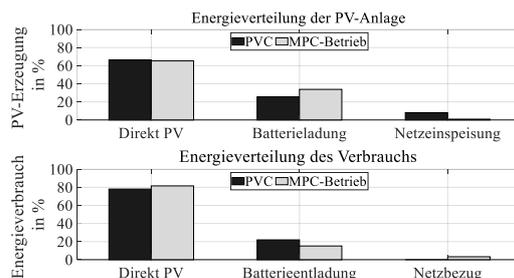


Abbildung 11: Energieverteilung der PV-Anlage (oben) und des Verbrauchs im Gebäude (unten) im Vergleich von PVC-Simulation zu MPC-Betrieb

Tabelle 6:
Vergleich der Arbeitszahlen der Wärmepumpen und Booster

ARBEITS-ZAHL	PVC-SIM.	MPC-BETRIEB	AB-WEICHUNG
MWPs	4,5	4,9	- 8,2 %
Booster	4,3	4,5	- 4,4 %

ERGEBNISANALYSE UND DISKUSSION

Die Modelle der PVC und MPC sind gut geeignet um den thermischen Betrieb der MWPs und den PV-Eigenverbrauch zu bewerten. Die Abbildung der Batterie, insbesondere der Batterieentladung muss in weiteren Arbeiten überprüft und verbessert werden, da das Gebäude als Gesamtsystem verstanden und bewertet wird. Auch die Prognose der PV-Leistung sowie elektrischer, thermischer und TWW-Lasten muss verbessert werden. Ein Nachteil der Modelle ergibt sich aus der reinen Bilanzierung der Energieflüsse. Einflüsse von Temperaturen des Kondensators und der Pufferspeicher bleiben unberücksichtigt. Bei der Untersuchung beider Betriebsführungsstrategien konnte anhand von Messwerten gezeigt werden, dass die MWPs durch ein Absenken der Kondensatoraustrittstemperatur das Temperaturniveau im Pufferspeicher reduzieren. In der PVC wird die Kondensatoraustrittstemperatur durch einen geringeren Rücklauf aus dem Gebäude reduziert, da die MWPs eine Kondensatorspreizung von 5 K halten. Dies ist auf die direkte Kopplung von Rücklauftemperatur zur Kondensatoraustrittstemperatur zurückzuführen. Insbesondere bei Anwendung der MPC führt die gezielte Reduzierung der Leistungsvorgabe zu einer Verringerung der Kondensatorspreizung. Folglich reduziert die abgesenkte Kondensatoraustrittstemperatur das Temperaturniveau im Pufferspeicher. Die direkte Einbindung der MWPs an die Pufferspeicherkaskade ist daher mit Energieverlusten durch ungeeignete Temperaturbelastung verbunden.

Bei Auswertung des PVC-Betriebes für eine Woche konnte gezeigt werden, dass die Pufferspeicher-

kaskade bei vollem Speicherfüllstand die thermische Gebäudelast für nur drei Stunden decken konnte.

Der Vergleich der PVC-Simulation und des MPC-Betriebes zeigt, dass beide Betriebsführungen einen ähnlich hohen PV-Eigenverbrauch erzielen, jedoch ist die Effizienz der MWP's und Booster in der PVC-Simulation schlechter. Die Arbeitszahl der MWP's ist um 8,2 % und die der Booster um 4,4 % niedriger als im MPC-Betrieb. Dieser Unterschied ist auf einen hohen Leistungsbetrieb unter Anwendung der PVC zurückzuführen, der einen niedrigeren COP zur Folge hat. Ein langsames Beladen der Pufferspeicherkaskade in Teillast, wie in der MPC, ermöglicht eine bessere Arbeitszahl und damit einen effizienteren Betrieb der MWP's.

ZUSAMMENFASSUNG

Diese Arbeit zeigt die Entwicklung und Implementierung zweier Betriebsführungsstrategien für modulierende Wärmepumpen in einen Plusenergie-Reihenhauskomplex. Die Entwicklung und Bewertung der Betriebsführungsstrategien wurde in MATLAB umgesetzt. Anschließend wurde der reale Betrieb und insbesondere das Betriebsverhalten der MWP's mit der Simulation verglichen. Zudem wurden die Ergebnisse hinsichtlich PV-Eigenverbrauch und Effizienz der MWP's und Booster einander gegenübergestellt.

Unabhängig von der Betriebsführungsstrategie verursacht die direkte Einbindung der MWP's in die Pufferspeicherkaskade eine Temperaturabsenkung im Pufferspeicher, wenn die MWP's in einer niedrigeren Leistungsstufe fahren und dadurch die Kondensatorspreizung reduziert wird. Auch im leistungsgleichen Betrieb kann eine reduzierte Rücklauftemperatur aus dem Gebäude die Kondensatoraustrittstemperatur senken.

Der PV-Eigenverbrauch ist beim Vergleich beider Betriebsführungsstrategien ähnlich und zeigt einen geringen Unterschied von -1,1 %. Die Effizienz hingegen unterscheidet sich deutlich. Im MPC-Betrieb ist die Arbeitszahl der MWP's um 8,2 % und die der Booster um 4,4 % besser.

In weiteren Arbeiten muss überprüft werden, ob eine modifizierte Hydraulik zu einem effizienteren Betriebsverhalten der MWP's führen kann. Auch die Tatsache, dass eine Überbrückung mit der Pufferspeicherkaskade die thermische Last für nur drei Stunden abdeckt, stellt die Frage, ob andere Maßnahmen zur gezielten Nutzung von PV einen besseren PV-Eigenverbrauch zur Folge haben. Hierfür kommt die Ausnutzung der thermischen Gebäudemasse in Betracht.

DANKSAGUNG

Dieses Paper repräsentiert Ergebnisse aus dem Projekt „Herzo Opt - Monitoring der Gebäudehülle, des thermischen Raumkomforts und der Anlagentechnik mit Betriebsoptimierung“ (FKZ 03ET1641A). Das Projekt wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

LITERATUR

- Battaglia, M., Haberl, R., Bamberger, E. und Haller, M., 2017. Increased self-consumption and grid flexibility of PV and heat pump systems with thermal and electrical storage. *Energy Procedia* 135, 358-366.
- Betzold, C., Bordin S. und Dentel, A., 2021. Control strategies for modulating heat pumps in a plus energy building. *Heat Pump Conference 2021*. (Paper accepted for publication)
- Betzold, C. und Dentel, A., 2019. PV Optimized Control of Modulating Heat Pumps regarding PV Self-Consumption. *Building Simulation 2019*.
- Buderus, J., Betzold, C., Bordin, S., Kandasamy, K., Dentel, A., 2018. Gegenüberstellung zweier modellbasierter Optimierungen für den Wärmepumpenbetrieb. *BauSim 2018*.
- Dentel, A. und Betzold, C., 2017. Control Strategies for Geothermal Heat Pump Systems in Combination with Thermal and Electrical Storage Units. *Building Simulation 2017*.
- Fischer, D., Bernhardt, J., Madani, H., Wittwer, C., 2017. Comparison of control approaches for variable speed air source heat pumps considering time variable electricity prices and PV. *Applied Energy*.
- Gurobi Optimization, LLC., Gurobi Version 8
- Pichler, M., Heinz, A., Rieberer, R., 2017. Model predictive heat pump- and building control to maximize PV-power on site use. *12th IEA Heat Pump Conference 2017*.
- Psimopoulos, E., Leppin, L., Luthander, R. und Bales, C., 2016. Control algorithms for PV and Heat Pump system using thermal and electrical storage. *ISES International Solar Energy*.
- The MathWorks, Inc., MATLAB Version: 9.6.0.1072779 (R2019a)
- University of Madison-Wisconsin, 2015. TRNSYS-TRaNsient SYstems Simulation, Solar Energy Laboratory., Version 17.1.

(DIN 1946-6, 2019) ausgelegt. Diese bewegen sich bei geregelter Lüftung zwischen Lüftung zum Feuchteschutz (Minimum) und Intensivlüftung (Maximum). Bei unregelter Lüftung wird jeder Raum kontinuierlich mit dem ermittelten Nennluftvolumenstrom belüftet.

Bei der zentralen Lüftung sind Schlaf-, Wohn-, Kinderzimmer und Büro Zulufräume sowie Bad und Küche Ablufträume nach (DIN 1946-6, 2019). Die einfachste Regelung bei zentralen Anlagen, ist die Abluftregelung. Hierbei wird als Regelgröße die CO₂-Konzentration in der Abluftsammelleitung verwendet. Die Aufteilung der Volumenströme auf die einzelnen Räume ist hier konstant.

Ein komplexeres System stellt die zentrale Lüftungsanlage mit Einzelraumregelung dar. Hierbei wird in jedem Raum ein CO₂-Sensor und eine Stelleinrichtung zur Regelung des Volumenstroms benötigt. Dieses System erlaubt eine Regelung der einzelnen Räume sowie die dynamische Aufteilung der Volumenströme je nach Bedarf.

Bei den dezentralen Lüftungssystemen befindet sich in jedem Raum mindestens ein Lüftungsgerät. Unterschieden wird dabei zwischen alternierenden und nichtalternierenden Lüftungsgeräten. Bei nichtalternierenden Lüftungsgeräten befinden sich Zu- und Abluftventilator in einem Gerät. Die Zu- und Abluftvolumenströme sind so für jeden Raum immer ausbalanciert. Dadurch findet kein Luftaustausch über den Flur statt. Die Wärmerückgewinnung erfolgt über einen rekuperativen Wärmetauscher.

Alternierende Lüftungsgeräte (auch Pendellüfter genannt) sind Lüftungsgeräte mit einem Lüfter und regenerativem Wärmetauscher. Bei der Pendellüftung findet ein periodischer Wechsel zwischen Zu- und Abluftbetrieb statt, um eine Wärmerückgewinnung zu ermöglichen. Als Grundlage für die Simulation wurde der Pendellüfter PP60 der Fa. Maico verwendet (Maico, 2019). Dieser wechselt alle 70 s die Luftrichtung. Für die Änderung der Luftrichtung benötigt der Lüfter 11 s, in denen der mittlere Volumenstrom näherungsweise 0 m³/h beträgt (Wirnsberger, 2019). Der Pendellüfter hat einen maximalen Fördervolumenstrom von 45 m³/h. Um einen mit den anderen Lüftungssystemen vergleichbaren Luftaustausch zu erreichen, wird jeder Raum mit zwei Lüftern ausgestattet, sodass der mittlere zugeführte Volumenstrom annähernd 45 m³/h ist. Die Pendellüfter in den Ablufträumen sind gegengleich getaktet, sodass ein Abluftraum ein in sich geschlossenes System darstellt. Die zwei Pendellüfter eines Zulufrumes sind jeweils gleich getaktet. So erfahren Zu- und Ablufträume die gleiche mittlere Frischluftzufuhr. Jedoch findet zwischen den Zulufräumen zusätzlich ein Luftaustausch über den Flur statt. Über die gegengleiche Taktung von jeweils zwei gemeinsam geregelten Zulufräumen (Regelgruppen, siehe Abschnitt Regelgruppen bei der Pendellüfterregelung) wird eine ausgeglichene

Volumenstrombilanz sichergestellt. Die dynamische Einteilung der Zulufräume in Regelgruppen bietet Spielraum für Optimierungen.

Bei allen Regelkonzepten, außer der Abluftregelung bei der zentralen Lüftungsanlage, kann der Zu- bzw. Abluftvolumenstrom raumweise eingestellt sowie die CO₂-Konzentration raumweise geregelt werden.

Der Luftaustausch zwischen den Räumen findet stets über den Flur statt. Die Wohnung wird als luftdicht angenommen.

Ziel ist es, den Einfluss der Regler in Kombination mit unterschiedlichen Lüftungskonzepten zu untersuchen. Aus diesem Grund wurde für alle Lüftungssysteme eine Rückwärmezahl von 0,8 angenommen.

Belegung der Wohnung

Die für die Simulation verwendete, tägliche Raumbelegung wurde für eine vierköpfige Familie angenommen und ist in Abbildung 2 aufgeführt. Es wird angenommen, dass es sich um 2 berufstätige Erwachsene sowie zwei schulpflichtige Kinder handelt. Die CO₂-Emission ist dabei pro Person 20 l/h im Wachzustand und 10 l/h beim Schlafen (Seifert, 2019).

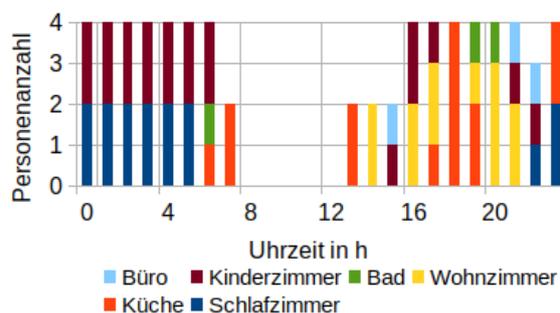


Abbildung 2: Tagesverlauf der Raumbellegung

Die Werte für die raumweise Feuchteabgabe sind in Anlehnung an (DIN 4108, 2010) gewählt und in Abbildung 3 dargestellt.

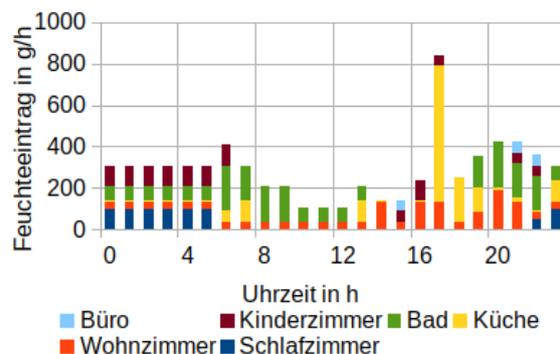


Abbildung 3: Tagesverlauf, Feuchteemission

Personen geben demnach 50 g/h im Ruhezustand ab. Es wird angenommen, dass sich 10 Pflanzen in der Wohnung befinden, die jeweils 2 g/h Wasser abgeben. Weiter wird täglich ein Kochvorgang inkl. 20 Minuten Geschirrspülen, einmal Duschen pro Person sowie einmal Wäschetrocknung im Bad angenommen.

Wetterdaten

Die Lüftungswärmeverluste hängen, neben dem Luftwechsel und dem Wärmerückgewinnungsgrad, von der Außentemperatur ab und wurden deshalb für alle Heiztage eines Jahres ermittelt (Aimer, 2019). Verwendet wurde ein TRY-Datensatz des Standorts Mühldorf am Inn (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), 2010).

Modellierung des Multizonenmodells

Die Stoffmengenkonzentration wird für jeden Raum nach Gleichung (1) bestimmt (die Berechnung erfolgt analog für die spezifische Luftfeuchte) (Aimer, 2019).

$$\sigma = \sigma_{aus} = \int Q_{CO_2, Raum} + \sigma_{ein} Q_{Lüftung} - \sigma Q_{Lüftung} dt \frac{1}{V_{Raum}} + \sigma_{init} \quad (1)$$

i.d.R. gilt $\sigma_{init} = \sigma_{außen}$

Die volumenspezifische CO₂-Konzentration σ ergibt sich durch umstellen der Volumenstrombilanz. Berechnet wird die Konzentration aus der Summe der Startkonzentration σ_{init} und dem Verhältnis des CO₂-Volumens im Raum zum Raumvolumen V_{Raum} . Das CO₂ im Raum setzt sich zusammen aus dem Integral des Volumenstroms des im Raum emittierten CO₂ $Q_{CO_2, Raum}$ sowie des CO₂ der Zuluft- $\sigma_{ein} Q_{Lüftung}$ und Abluftvolumenströme $\sigma Q_{Lüftung}$ des Raums.

Zusätzlich wurde die Adsorption von Wasserdampf in den Innenflächen der Forschungswohnung über das PT₁-Glied in Formel (2) modelliert. Der Verstärkungsfaktor und die Zeitkonstante wurden dafür aus einer Messreihe zum zeitlichen Adsorptionsverhalten von Sperrholz aus (Klinge, 2016) ermittelt.

$$G_W(s) = \frac{\Delta m_{w,w}(s)}{\Delta x_v(s)} = \frac{\kappa_{ad} A}{\tau_{ad} s + 1} = \frac{5,8345 \text{ kg/m}^2 A}{5hs + 1} \quad (2)$$

Für mehr Informationen zur Modellierung, siehe (Aimer 2019).

Bewertungsgrößen

Die Lüftungswärmeverluste wurden über die zum Aufheizen der Außenluft auf Raumtemperatur sowie der zur Verdunstung bei Feuchtequellen innerhalb der Wohnung benötigten Enthalpie, wie in Formel (3) genähert.

$$\begin{aligned} \dot{H}_V &= \dot{H}_W + (\vartheta_i - \vartheta_a)(c_{p,l}(1 - x_a) + c_{p,w}x_a) \cdot \\ &\quad \cdot Q_{f,g} \rho_{f,i} \quad (3) \\ H_{V,rc} &= 0,2H_V = 0,2 \int \dot{H}_V dt \end{aligned}$$

Mit dH_w/dt als Verdunstungsenthalpiestrom, ϑ_i als Innen- und ϑ_a als Außentemperatur, $c_{p,l}$ als spezifische Wärmekapazität von trockener Luft und $c_{p,w}$ von Wasserdampf, x_a als spezifische Luftfeuchte der Außenluft, $Q_{f,g}$ Gesamtfortluftvolumenstrom sowie $\rho_{f,i}$ als Dichte feuchter Luft im Innenraum. H_v bezeichnet die Lüftungsenergieverluste ohne Wärmerückgewinnung und $H_{v,rc}$ die Lüftungsenergieverluste mit einem für alle Lüftungssysteme angesetzten Wärmerückgewinnungsgrad von 80 %.

Bei der Wohnraumlüftung existieren in Deutschland keine Grenzwerte für die CO₂-Konzentration. Jedoch hat sich der Pettenkofer-Grenzwert, nach dem Luft mit einer CO₂-Konzentration größer als 1000 ppm als schlecht zu bezeichnen ist, als Grenzwert etabliert (Guyot, 2019). Da die CO₂-Konzentration als Differenz zur Umgebungskonzentration geregelt werden soll, wird deshalb ein Sollwert von 600 ppm (bei einer angenommenen mittleren Umgebungskonzentration von 400 ppm) veranschlagt.

Die kumulierte Grenzwertüberschreitung der CO₂-Konzentration, die CO₂-Überstunden τ_{ex} werden nach Formel (4) berechnet und haben die Einheit ppm·h. Diese Bewertungsgröße ist interessant, da nicht nur die Grenzwertüberschreitung allgemein, sondern auch deren Höhe und Dauer mit einfließt.

$$\tau_{ex} = \int \sigma - \sigma_{soll} dt |_{\sigma > \sigma_{soll}} \quad (4)$$

Berechnet werden die CO₂-Überstunden raumweise, für alle Heiztage eines Jahres, da in Deutschland Lüftungsanlagen üblicherweise, außer zu Wartungszwecken, immer laufen (DIN1946-6, 2019).

Analog dazu werden Feuchteüberstunden nach Formel (5) berechnet. Die relative Feuchte in Innenräumen sollte $\varphi_{ref,max} = 75\%$ nicht überschreiten, um Schimmel zu vermeiden.

$$\tau_{ex,\varphi} = \int \varphi - \varphi_{ref,max} dt |_{\varphi > \varphi_{ref,max}} \quad (5)$$

Ausschlaggebend für die Bewertung ist der Raum mit den meisten CO₂-Überstunden bzw. Feuchteüberstunden über das Jahr. Dieser Wert geht dann in die Bewertung des Systems ein.

Regler

Eine Lüftungsregelung kann gegenüber der konstanten Lüftung einige Vorteile mit sich bringen. Primäres Ziel der geregelten Lüftung ist es, die Lüftungswärmeverluste zu reduzieren und gleichzeitig mindestens die gleiche Luftqualität wie bei konstantem Betrieb zu erreichen. Für die Umsetzung der Regelung wurde ein PI-Regler und ein Fuzzy-Regler implementiert. Dabei wurde bei beiden Reglern auf die maximale CO₂-Sollkonzentration geregelt. Bei der Fuzzy-Regelung wurde zudem die relative Luftfeuchte in einem Bereich zwischen 30 und 75 % in allen Räumen geregelt. Bei der PI-Regelung fand hier optional eine Regelung auf 50 % relative Luftfeuchte, anstatt auf die CO₂-Sollkonzentration, beispielsweise im Bad bei der Einzelraumlüftung, statt.

Die PI-Regelung wurde in der Simulation für alle Lüftungssysteme verwendet. Sie besteht je nach Einsatz aus der zentralen Einheit (siehe Formel (6)) sowie aus unterschiedlichen vor- und nachgeschalteten Gliedern, die beispielsweise für die Begrenzung der Volumenströme oder für eine optimale Aufteilung der Luft auf die Räume sorgen. Siehe für weitere Details (Aimer, 2019).

Wegen der beschränkten Stellgrößen (nach oben und unten begrenzte Volumenströme) wurde der PI-Regler mit einem Anti-Windup-Filter mit Back Calculation nach (Visioli, 2006) erweitert, um eventuellen Verzögerungen bei der Reaktion des Reglers bei längerem Über- oder Unterschreiten des erlaubten Bereiches vorzubeugen. Der PI-Regler wurde damit nach Formel (6) umgesetzt.

$$Q_{sg,0} = eP + \int Ie + \frac{Q_{sg} - Q_{sg,0}}{T_t} dt \quad (6)$$

Mit e als Abweichung vom Sollwert, P als proportionale Verstärkung, I als integrative Verstärkung, $T_t = P/I$ als Zeitkonstante des Anti-Windup-Filters, $Q_{sg,0}$ als Reglerausgangsgröße vor der Steuergrößenbeschränkung und Q_{sg} als beschränkte Steuergröße.

Geeignete Werte für P und I wurden für jeden Regler nach dem Verfahren von Ziegler und Nichols (Unbehauen, 2007) ermittelt.

Die Fuzzy-Regelung wurde für die nichtalternierende Einzelraumlüftung sowie für die zentrale Lüftung verwendet. Sie erlaubt, es auf Basis von verschiedenen Eingangsgrößen (hier Außentemperatur, relative Luftfeuchte und CO₂-Konzentration der Räume) sowie zuvor festgelegten, verbalen Entscheidungsregeln (Inferenzregeln), automatisch Entscheidungen zur Steuerung zu treffen. Ein Beispiel hierfür wäre in etwa: „Viel Lüften, wenn CO₂-Konzentration hoch und relative Luftfeuchte hoch ist“.

Neben den Inferenzregeln sind die Fuzzy-Mengen (*engl.: fuzzy sets*) ein wichtiges Konzept dieser Regelung. Die Fuzzy-Mengen erlauben partielle Zugehörigkeiten von Eingangsgrößen, wie CO₂-

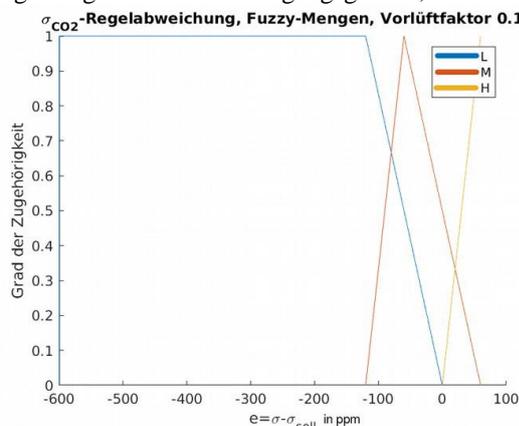


Abbildung 4: Fuzzy-Mengen für $e = \sigma - \sigma_{soll}$, L: $\sigma - \sigma_{soll}$, L: niedrige, M: mittlere, H: hohe CO₂-Konzentration, aus (Aimer, 2019)

Konzentration, relative Luftfeuchte oder Außentemperatur zu bestimmten Kategorien, wie z.B.: hoch, mittel, niedrig.

Dazu wurden beispielsweise für die CO₂-Konzentration (hier handelt es sich um die Regelabweichung der Differenz zur Außenluft) Zugehörigkeitsfunktionen wie in Abbildung 4 angewendet. Auf Basis der bei der Fuzzifizierung ermittelten Zugehörigkeitsgrade aller Eingangsgrößen zu den jeweiligen Eingangs-Fuzzy-Mengen (L: niedrig, M: mittel, H: hoch) werden so mithilfe der Inferenzregeln und anschließend mithilfe der Regeln zur Verknüpfung von Fuzzy-Mengen die Zugehörigkeitsgrade zu den Ausgangs-Fuzzy-Mengen berechnet. Aus diesen Zugehörigkeitsgraden wird bei der Defuzzifizierung der benötigte Volumenstrom als Ausgangsgröße berechnet.

Für mehr Informationen zur entworfenen Fuzzy-Regelung, siehe (Aimer, 2019).

Regelgruppen bei der Pendellüfterregelung

Die PI-Regelung bei der Pendellüftung unterliegt bei raumweiser Ansteuerung wegen des raumübergreifenden Charakters und der periodischen Richtungswechsel der Volumenströme besonderen Anforderungen: Zum einen soll grundsätzlich die Volumenstrombilanz im Flur durch die Lüfteransteuerung für einen Druckausgleich immer gleich 0 sein, zum anderen soll jeder Raum möglichst nach den jeweiligen Anforderungen belüftet werden. Für die dafür nötige Koordination zwischen den Räumen wird im Folgenden der Lösungsansatz der Bildung von Regelgruppen (Benutzung eines Reglers für zwei Räume mit ähnlichem Lüftungsbedarf) vorgestellt.

Die Idee der Regelgruppen ist es, dass jeweils zwei der vier Zulufräume einer Gruppe zugeteilt werden, für die dann ein gemeinsamer Regler eine gemeinsame Steuergröße berechnet. Die Zuordnung kann fest sein oder dynamisch, je nach Lüftungsbedarf erfolgen. Bei der dynamischen Zuordnung werden die Räume standardmäßig der Regelgröße nach geordnet und die ersten zwei sowie die letzten zwei jeweils in eine Gruppe eingeteilt. Für jede dieser Gruppen wird dann die höhere Regelgröße der beiden Räume verwendet, sodass einem Überschreiten des Sollwertes entgegengewirkt wird. Dies kann dazu führen, dass ein Raum in einer Gruppe mehr belüftet wird als nötig.

Die dynamische Einteilung in Regelgruppen, die sich eigentlich positiv auf die Lüftungseffektivität und mindernd auf die Lüftungswärmeverluste auswirken sollte, zeigte in der Simulation unerwünschte Effekte wie häufige Stellgrößen sprünge oder Phasenumkehr des periodischen Wechsels aus Zu- und Abluftbetrieb (Weiterlüften eines Lüfters in die gleiche Richtung nach einer halben Periode aufgrund eines Wechsels der Regelgruppe), die sich sehr ungünstig auf die Wärmerückgewinnung auswirken können. Deshalb wurden verschiedene Modifikationen der dynamischen Regelgruppeneinteilung durch Setzen

von Randbedingungen (wie: Verhindern der Phasenumkehr der Pendellüfter eines Raumes, zwei Räume mit der geringsten Differenz der CO₂-Konzentrationen bilden die erste Gruppe oder Vorfiltern der Regelgrößen am Reglereingang über ein PT₂-Glied) entwickelt. Es stellte sich heraus, dass diese zusätzliche Dynamik durch Vorfiltern der Regelgrößen mit dem PT₂-Glied relativ gut unterbunden werden kann. Eine weitere, einfachere Möglichkeit stellt die feste Zuweisung von Räumen mit tendenziell gleichzeitiger Raumbelugung, wie z.B.: Schlaf- und Kinderzimmer (beide in der Nacht durch jeweils zwei Personen belegt) in gemeinsame Regelgruppen dar.

Für mehr Informationen, siehe (Aimer, 2019).

SIMULIERTE KONFIGURATIONEN, VERGLEICH DER KONFIGURATIONEN UND VARIATIONEN

Um eine Bewertung und einen Vergleich der Konfigurationen aus Lüftungssystemen und Reglern vornehmen zu können und möglichst ein jeweiliges Optimum zu ermitteln, wurden jeweils entsprechende Parameter der Regelung oder der Ansteuerung der Lüftungssysteme, variiert von denen angenommen wurde, dass sich diese auf die Energieverluste und die Luftqualität auswirken können. Die wichtigsten dieser vorgenommenen Variationen sind im Folgenden geschildert.

Als Gütekriterium für die simulierten Variationen soll gelten, dass die Energieeinsparung möglichst hoch und die CO₂-Überstunden τ_{ex} nicht höher, als bei der zentralen Lüftung im konstanten Betrieb sein sollen. Die zentrale Lüftung wurde hier als Referenz gewählt, da sie in der Simulation die besten Werte unter den konstanten Lüftungen erzielt.

Zentral Lüftung, Abluftregelung: Sollwertabsenkung

Die CO₂-Überstunden sind bei der Abluftregelung mehr als doppelt so hoch, wie bei der unregelmäßigen Lüftung (siehe Abbildung 5). Dies liegt zum einen an einer Verzögerung der Erfassung der CO₂-Konzentrationen in den Zulufräumen und zum anderen daran, dass die CO₂-Konzentration in der Abluft lediglich die Mischkonzentration der Ablufträume darstellt. Die CO₂-Konzentration in einzelnen Räumen kann aber weit über dem Sollwert liegen. Deshalb soll hier eine Verringerung von τ_{ex} erreicht werden, indem der Sollwert für die Regelung der Abluftkonzentration jeweils um 25, 50 und 75 % abgesenkt wird (Der Sollwert zur Berechnung von τ_{ex} bleibt hierbei unverändert bei 600 ppm gegenüber Außenkonzentration). Die Idee dabei ist, dass durch den geringeren Sollwert bereits früher gelüftet wird, was die Verzögerung bei der Messung der teils sehr hohen Konzentrationen in den Zulufräumen ausgleichen könnte.

Zentrale Lüftung, Fuzzy-Regelung: Variation Vorlüftfaktor

Der Vorlüftfaktor k_{vl} beschreibt, um welchen Anteil der Regler bei relativ hohen Außentemperaturen (Stunde des jeweiligen Tages mit der höchsten Temperatur) unter die Sollgröße (CO₂-Konzentration) Regeln darf. Die Idee der Vorlüftung ist, den Luftaustausch zeitlich zu verschieben und dadurch Energieeinsparungen im Winter zu bewirken. k_{vl} beeinflusst dabei die Regelung als Parameter der Zugehörigkeitsfunktionen zu den Fuzzy-Mengen L und M der CO₂-Konzentration (siehe Abbildung 4).

Bei dieser Variation soll die in (Aimer, 2019) genauer beschriebene Idee mittels Variation von k_{vl} bei der Kombination aus zentraler Lüftung und Fuzzy-Regelung auf Sinnhaftigkeit überprüft sowie gegebenenfalls ein optimaler Parameter k_{vl} ermittelt werden. Dazu wurden zunächst Simulationen mit den Werten 0,1, 0,2 und 0,3 als Vorlüftfaktor durchgeführt, um die Auswirkung auf die Gesamtenergiebilanz durch das Vorlüften anhand der Jahreswerte zu überprüfen. Zudem wurde eine Simulation ohne Vorlüften durchgeführt.

Pendellüfter – PI-Regler: Modifikationen der Gruppeneinteilung, feste Gruppen

Im Abschnitt Regelgruppen bei der Pendellüfterregelung wurden verschiedene Modifikationen der dynamischen Regelgruppeneinteilung erwähnt. Hier wurden diese zusammen mit den drei Möglichkeiten, die vier Räume in fixe Zweiergruppen einzuteilen miteinander verglichen.

Variationen des konstanten Betriebs bei allen Lüftungssystemen um Faktor C

Zur Untersuchung der Möglichkeiten einer konstanten Lüftung wird, in Anlehnung an die Lüftungsstufen nach (DIN1946-6, 2019) (Lüftung zum Feuchteschutz: $Q_{FL}=0,2Q_{NL}$, Nennlüftung: Q_{NL} und Intensivlüftung $Q_{IL}=1,3Q_{NL}$), eine Simulation für jede Variation der konstanten Volumenströme um einen Faktor C durchgeführt. Dabei soll keine optimale Einstellung, sondern die Auswirkung einer erhöhten, oder verringerten Lüftung (von einer angesetzten Ausgangslage aus) auf die Lüftungsenergieverluste sowie auf die CO₂-Überstunden untersucht werden.

Für mehr Informationen zu den simulierten Variationen, siehe (Aimer, 2019).

AUSWERTUNG UND DISKUSSION

Ergebnisse aus dem Vergleich der Variationen

Abbildung 5 zeigt alle simulierten Konfigurationen aus Lüftungssystemen und Reglern mit den zuvor beschriebenen Variationen im Vergleich bezüglich Lüftungswärmeverlusten $H_{v,rc}$ und Luftqualität bzw. CO₂-Überstunden τ_{ex} . Die Einträge der Legende listen jeweils das Lüftungssystem, die verwendete Regelung und ggf. zusätzliche Parameter auf, die den zuvor

genannten Variationen entsprechen und beschreiben so die Simulierten Fälle.

Als beste Einstellung der Abluftregelung mit Sollwertabsenkung resultiert eine Absenkung von 50 %. Diese hat allerdings fast den gleichen Jahresenergieverlust wie die konstante Lüftung.

Bei der Vorlüftung während erhöhten Außentemperaturen bei der fuzzy-geregelten zentralen Lüftung stellte sich bei erhöhtem k_{vl} keine Verbesserung bezüglich Energieverlusten ein. Stattdessen führte die Deaktivierung der Vorlüftung zu den niedrigsten Energieverlusten. Diese Idee des Vorlüftens stellt somit keine Möglichkeit der Energieeinsparung dar. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass wegen der Durchmischung der Raumluft bei geringerer CO_2 -Konzentration bei gleichbleibendem Zuluftvolumenstrom weniger CO_2 aus dem Raum abgeführt wird, als bei hoher CO_2 -Konzentration. Das simulierte Vorlüften findet also mit analog zur CO_2 -Konzentration abnehmender Effektivität statt.

Aus dem Vergleich der Einteilung der Regelgruppen bei der Pendellüfterregelung geht hervor, dass eine feste Einteilung von Schlaf- und Kinderzimmer aufgrund der gleichzeitigen Belegung dieser Räume in der Nacht zur effizientesten Lüftung unter den festen Gruppeneinteilungen führt. Eine zusätzliche, leichte Verbesserung ist bei dynamischer Regelgruppeneinteilung bei allen Modifikationen sichtbar, wobei hier nur die Modifikation mit vorgefilterten Reglereingangsgrößen häufige Stellgrößensprünge und Phasenumkehrungen verhindert. Diese sollte deshalb als einzige Modifikation unter den dynamischen Gruppeneinteilungsverfahren aufgrund der genannten Einschränkungen bei der tatsächlichen Wärmerückgewinnung gewählt werden sollte.

Aus der Variation der konstanten Lüftungssysteme um bestimmte Faktoren geht hervor, dass ohne Regelung stets ein Kompromiss zwischen gesteigerter Luftqualität und Energieverlusten (bei erhöhtem Volumenstrom) und verringerter Luftqualität und Energieverlusten (bei verringertem Volumenstrom) geschlossen werden muss. Das inverse Verhältnis zwischen τ_{ex} und $H_{v,rc}$ bei den unregulierten Systemen sollen die in Abbildung 5 eingezeichneten Kurven für alle drei Lüftungssysteme verdeutlichen.

Vergleich geregelte und unregelte Lüftung

Aus Abbildung 5 ist weiter ersichtlich, dass die geregelten Lüftungssysteme links der Kurven liegen, die den inversen Zusammenhang zwischen τ_{ex} und $H_{v,rc}$ beschreiben, und die meisten davon zudem sowohl bessere Luftqualität als auch niedrigere Energieverluste aufweisen, als die zentrale Lüftung im konstanten Betrieb. Dies ist auf die gezieltere Lüftung der Räume zurückzuführen, die durch die Erfassung der CO_2 -Konzentrationen und die raumweise Bestimmung des Volumenstroms bewirkt wird.

Ist die Erfassung der CO_2 -Konzentration und die Steuerbarkeit der Volumenströme reduziert, wie bei der zentralen Lüftung mit Abluftregelung, so stellt sich keine oder nur eine kleine Verbesserung ein (in diesem Beispiel nur durch Sollgrößenabsenkung).

Die Fuzzy-Regelung bewirkt im Vergleich zur PI-Regelung niedrigere Energieverluste. Dies liegt zum einen daran, dass bei der Fuzzy-Regelung als Mehrgrößenregelung die Luftfeuchte in jedem Raum geregelt wird und die Mindestlüftung zum Feuchteschutz nach (DIN1946-6, 2019) entfallen kann. Zum anderen findet eine Regelung im Bereich von 30 bis 75 % statt (im Gegensatz zur Sollgröße beim PI-Regler von 50 %), wobei ein Überschreiten dieses Bereiches aufgrund der höheren spezifischen Luftfeuchte mit weniger Lüftungsaufwand verhindert wird.

Das relativ gute Abschneiden der Pendellüftung bei den Energieverlusten in dieser Simulation ist, abgesehen von einem konstant für alle Systeme angenommenen Wärmerückgewinnungsgrad, folgendermaßen zu erklären: Bei der hier vorgestellten Konfiguration ist eine gezieltere Belüftung der Zulufräume möglich. Bei der zentralen Lüftung kann der Fall auftreten, dass eigentlich nur Zu- oder nur Ablufträume belüftet werden müssten. Dabei muss aber der Luftvolumenstrom für alle zu belüftenden Räume als Außenluft in die Wohnung zugeführt werden. Für diesen Fall entfällt der mögliche Vorteil der Kaskadenlüftung, einer mehrfachen Beladung der Luft mit Schadstoffen. Bei der Pendellüftung hingegen sind die Zulufräume in dynamischen Regelgruppen verschalten, sodass immer möglichst die Zulufräume mit dem höchsten Lüftungsbedarf auch den höchsten Luftwechsel erfahren und so eine maximale Beladung der Luft mit Kontaminanten ermöglichen und gleichzeitig die Menge der von außen zuzuführenden Luft minimieren.

Bei der Annahme des Wärmerückgewinnungsgrades von 0,8 lag der Fokus auf dem Vergleich der Regelungskonzepte untereinander. In der Realität können jedoch Pendellüfter einen schlechteren Wärmerückgewinnungsgrad aufweisen. Dem negativen Effekt auf die Wärmerückgewinnung durch Dysbalancen der Zu- und Abluftvolumenströme wird jedoch dadurch entgegengewirkt, dass die entwickelte Regelung für eine ausgeglichene Volumenstrombilanz sorgt.

ZUSAMMENFASSUNG

Mit der entwickelten Simulationslösung können verschiedene Lüftungssysteme in Kombination mit unterschiedlichen Reglern simuliert werden. Die Anzahl und Verschaltung der Räume ist frei konfigurierbar. Die Zu- und Abluftvolumenströme können für jeden Raum festgelegt werden. Über die Volumenströme können die daraus resultierenden CO_2 und Wasserdampf-Konzentrationen in jedem Raum bestimmt werden.

Die entwickelten Regelkonzepte für die unterschiedlichen Lüftungssysteme zeigen in der Simulation die Möglichkeiten der Optimierung durch eine geregelte Lüftung bezüglich Reduktion der Lüftungsenergieverluste sowie Steigerung der Raumluftqualität. Für die Realisierung dieser Konzepte werden, neben Messeinrichtungen für CO₂-Konzentration und relative Luftfeuchte in allen Zu- bzw. Ablufträumen sowie einer zentralen Recheneinheit, bei der zentralen Kaskadenlüftung zusätzlich Stelleinrichtungen zur Aufteilung des Zu- bzw. Abluftvolumenstroms auf die einzelnen Räume benötigt.

Der PI- sowie der Fuzzy-Regler wurden zunächst unabhängig von den jeweiligen Lüftungssystemen entworfen. Eine Anpassung erfolgt beim PI-Regler über die Ermittlung der Parameter P, I und T_t und beim Fuzzy-Regler über die Skalierung der Ausgangs-Fuzzy-Mengen.

Zudem wurde für den Fuzzy-Regler ein Konzept erarbeitet, um mit der Lüftung bereits vor Erreichen des Sollwertes aufgrund von CO₂- oder Wasserdampfemissionen zu beginnen. Dieses Konzept erwies sich jedoch als unvorteilhaft aus energetischer Sicht sowie aus Sicht der Raumluftqualität, da die Effektivität der Lüftung (CO₂-Abnahme pro eingebrachter Frischluft) bei abnehmender Konzentration ebenfalls abnimmt (vgl. Ableitung Formel (1)).

Die in dieser Arbeit erarbeiteten Konzepte für Stell- und Regeleinrichtungen wurden durch Simulation mit anderen, einfacheren Lösungen wie der Regelung nach Messungen in der Abluft und feste Aufteilung der Volumenströme bei der zentralen Lüftung oder Lüftung mit konstantem Volumenstrom verglichen. Dabei zeigte sich, dass die Energieverluste durch eine Regelung und den entwickelten Konzepten für Pendellüftung und zentrale Lüftung um ein Drittel bis die Hälfte gegenüber der zentralen Lüftung im konstanten Betrieb verringert werden können.

Wenn die nach einer Wärmerückgewinnung verbleibenden Energieverluste nicht vernachlässigbar sind und keine zu hohen Anschaffungskosten für die zusätzliche Technik im Weg stehen, stellt die geregelte Lüftung durch die raumweise Bedarfserfassung und Einstellung des Zuluftvolumenstroms für jeden Raum ein gutes Mittel dar, um die Energieverluste wesentlich zu verringern und dabei auch in der Gesamtbilanz Kosten einzusparen.

Dem Gewinn an Raumluftqualität und der Verringerung an Lüftungswärmeverlusten stehen höhere Anschaffungskosten wegen der zusätzlichen Mess- und Regelungstechnik entgegen. Es bleibt aber abzuwarten, wie sich diese zusätzlichen Kosten in Zukunft entwickeln werden. Zudem könnte hier gegebenenfalls der zusätzliche Aufwand reduziert werden, indem mit durchdachteren Kombinationen aus Lüftungs- und Regelkonzepten auf einen Teil der Mess- und Stelleinrichtungen verzichtet werden kann.

LITERATUR

- Aimer, D. 2019. Simulation von Lüftungssystemen zum Entwurf eines Reglers für optimierte Luftqualität und Energieeffizienz, Technische Hochschule Rosenheim, Rosenheim Deutschland.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) 2010. Testreferenzjahr, Station: Muehldorf, Bezugszeitraum : 1988-2007, Typ: Mittleres Jahr, <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ZB/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2013/testreferenzjahre/01-start.html>
- DIN 1946-6 2019. Raumlufttechnik - Teil 6: Lüftung von Wohnungen - Allgemeine Anforderungen, Anforderungen an die Auslegung, Ausführung, Inbetriebnahme und Übergabe sowie Instandhaltung, Beuth Verlag, Berlin
- DIN 4108, DIN-Fachbericht 4108-8:2010-09, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 8: Vermeidung von Schimmelwachstum in Wohngebäuden, Beuth Verlag, Berlin
- Dols, W. S., Walton, G. N., Denton, K. R. 2000. CONTAMW 1.0 User Manual, NISTIR 6476, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg MD USA.
- Guyot, G., 2019. Towards a better integration of indoor air quality and health issues in low-energy dwellings: Development of a performance-based approach for ventilation. Communauté Université Grenoble Alpes, 2018.
- Kesselring, J. P., Koontz, M. D., et alii 1993. Evaluation of residential ventilation controller technology, Proceedings of 'Indoor Air '93', S. 73-78
- Klepeis, N. E., Nelson, W. C., et alii 2001. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants, Journal of exposure analysis and environmental epidemiology Vol. 11, S. 231-252
- Klinge, A., Roswag-Klinge, E., et alii 2016. Reduktion von Lüftungstechnik durch den Einsatz klimasteuernder Naturbaustoffe – Ergebnisse aus dem EU Forschungsvorhaben H-House und der Baupraxis, LEHM 2016, 2016, S. 5-6
- Lachhab F., Essaaidi, M., et alii 2015. A state-feedback approach for controlling ventilation systems in energy efficient buildings, 2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), S. 1-6
- Maico Elektroapparate-Fabrik GmbH. 2019. Produktdatenblatt PP 60 K-SE, Abgerufen: 01.04.2020, URL: <https://www.maico->

- ventilatoren.com/cms-live/DE/Ausschreibungstexte/DB/DB_DE_PP_60_K-SE_0095.0204_p112421.PDF
- Rotger-Griful, S., Jacobsen, D., Sørensen, G. 2016. Demand response potential of ventilation systems in residential buildings, *Energy and Buildings* 121, S. 1-10
- Seifert 2019. Grundlagen der Wärmephysiologie. Theoretische Grundlagen, stationäre und instationäre Modelle. ITM InnoTech Medien GmbH, Augsburg.
- Unbehauen, H. 2007. Regelungstechnik I, Vieweg & Sohn Verlag, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden
- Visioli, A. 2006. Practical PID Control, London, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg
- Wirnsberger, M., Buttinger, F., Krause, H. 2019. Ventilation Efficiency Of Push-Pull Ventilation Systems In Residential Buildings – CFD Simulation And Validation Of The Model With Measurements In A Research Apartment, 16th IBPSA International Conference And Exhibition, Rome Italy..

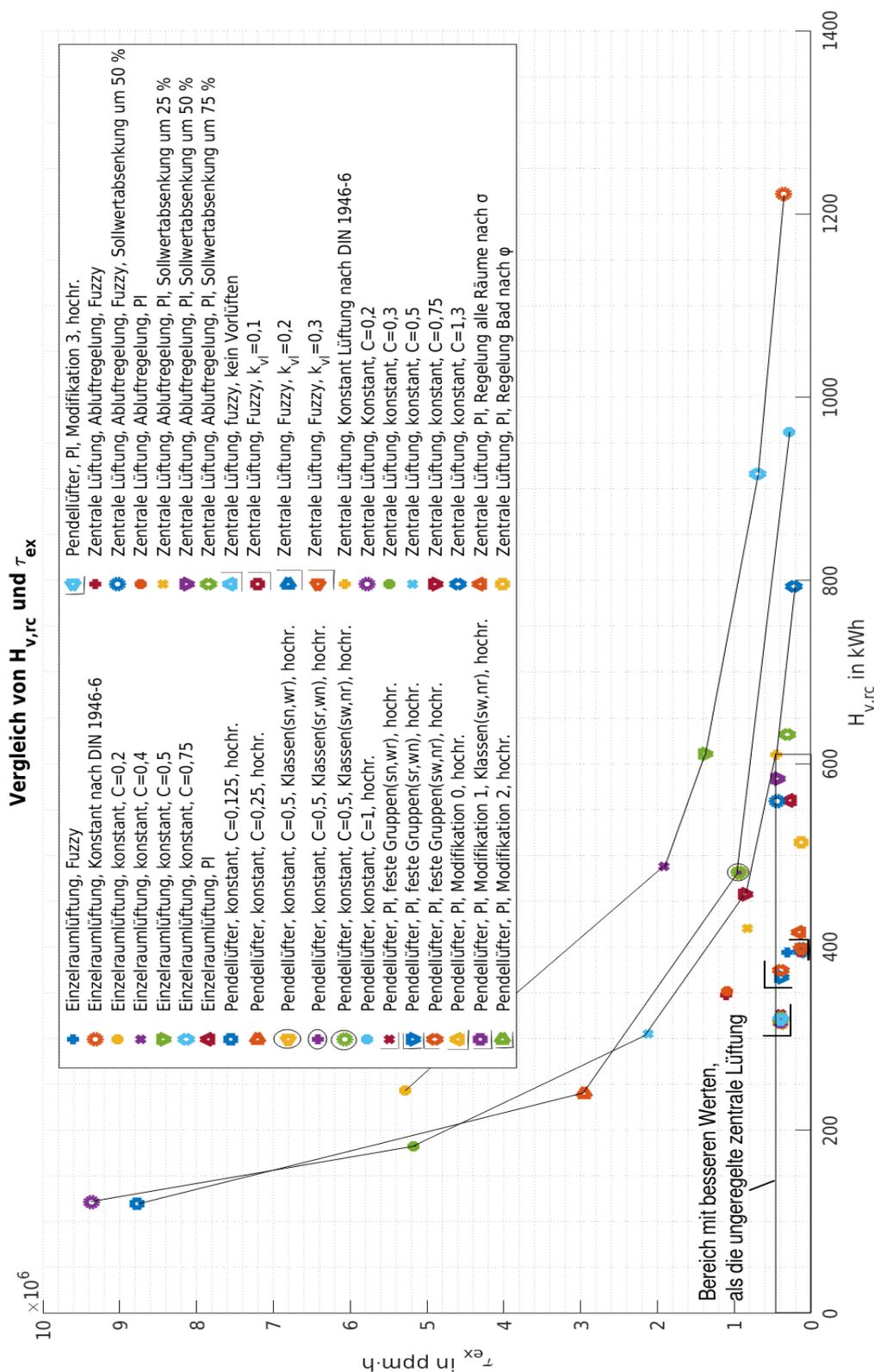


Abbildung 5: τ_{ex} - $H_{v,rc}$ -Diagramm aller simulierten Konfigurationen (Eingezeichnete Kurve für jedes Lüftungssystem für Variationen von C; Gruppierung nahe beieinander liegender Punkte mit den Symbolen: □, L, J, O zur besseren Ordnung über die Legende), Erklärungen zur Legende: hochr.→Hochrechnung auf Basis eines gemittelten Heizztages, Klassen→Klassenkonfiguration der Räume (Einteilung von jeweils zwei Räumen mit gleich getakteten Lüftern), Gruppen→Regelgruppenkonfiguration der Räume (Einteilung von jeweils zwei Räumen mit gegengleich getakteten Lüftern und mit gleichen Volumenströmen), s→Schlafzimmer, w→Wohnzimmer, k→Küche, b→Bad, n→Kinderzimmer, r→Büro, z. B.: sn→Klasse aus s und n, PI→PI-Regelung, Fuzzy→Fuzzy-Regelung, kvl→Vorlüftfaktor, C→Variationsfaktor für konstante Lüftung

ENERGIEEFFIZIENZ DURCH BIG-DATA-ANALYSEN IN DER GEBÄUDEAUTOMATION

L. Lauss¹, J. Mehnert², J. Lebert², T. Auer¹ und S. Plesser³

¹Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, TU München, Deutschland

²Institut für Gebäude- und Solartechnik, TU Braunschweig, Deutschland

³Steinbeis-Innovationszentrum energie+, Braunschweig, Deutschland

E-Mail: lukas.lauss@tum.de; j.mehnert@tu-braunschweig.de

KURZFASSUNG

Eine große Anzahl von Bestandsgebäuden verfügt über Gebäudeautomationssysteme, die Sensor- und Aktordaten kontinuierlich erfassen. Diese Betriebsdaten spiegeln sowohl die Funktionsweise des Gebäudes als Gesamtes, als auch einzelner gebäudetechnischer Anlagen wider und fallen im Gebäudebetrieb massenhaft (Big Data) an. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde ein algorithmischer Big-Data-Baukasten als informationstechnologisches Rahmenwerk entwickelt, mit dessen Hilfe sich verschiedene Fragestellungen rund um die Analyse von Betriebsdaten effizient beantworten lassen. Der innovative Schwerpunkt liegt in der Entwicklung von skalierbaren und automatisierten Lösungen zur Minimierung von Performance Gaps. Durch die experimentelle Anwendung der Big-Data-Analysemethoden konnte die Identifikation von Potenzialen zur energetischen Betriebsoptimierung im Gebäudebestand aufgezeigt werden.

ABSTRACT

A large number of existing buildings have building automation and control systems that continuously record sensor and actuator data. These operating data reflect the functionality of the building as a whole as well as of individual building technology systems and are generated in large quantities (Big Data) during building operation. Within the framework of this research project, an algorithmic Big Data construction kit was developed as an information technology framework, with the help of which various questions concerning the analysis of operational data can be answered efficiently. The innovative focus lies in the development of scalable and automated solutions to minimize performance gaps. The experimental application of the Big Data analysis methods showed the identification of potentials for energy operation optimization in existing buildings.

EINLEITUNG

Die ambitionierten Klimaziele der Bundesregierung lauten, bis 2050 einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand zu realisieren (Umweltbundesamt, 2016). Für diese Umsetzung müssen wirksame Strategien und Maßnahmen entwickelt werden. Die bauphysikalischen Optimierungsmöglichkeiten, welche die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste betreffen sind größtenteils ausgeschöpft (Correal et al., 2014). Die Stärkung der Energieeffizienz gewinnt mehr an Bedeutung und die technische Gebäudeausrüstung (TGA) in Kombination mit der Gebäudeautomation (GA) wird priorisiert betrachtet. Resultierend gilt es Energieeinsparpotenziale in Gebäuden mit einer Gebäudeautomation ausfindig zu machen und zu nutzen. Dementsprechend bedeutend sind optimal ausgeführte und im Betrieb fehlerfrei funktionierende Anlagen, die dem planerischen Soll entsprechen und anschließend optimiert werden könnten. Folglich trägt eine energieeffiziente Gebäudebetriebsführung dazu bei, die Energieeffizienz zu steigern und die Treibhausgas-Emissionen zu senken.

In einem Großteil der Gebäude ist dies nicht der Fall, wodurch ein hohes Energieeinsparpotential gegeben ist. In diesem Zusammenhang tritt die Problematik auf, dass eine Leistungslücke zwischen dem vorhergesagten Energieverbrauch in der Entwurfsphase von Gebäuden und dem Energieverbrauch dieser sich in Betrieb befindlichen Gebäuden auftritt (Fisch et al., 2007, Réhault et al., 2014). Etabliert hat sich hierbei die Beschreibung des Performance Gaps, also der Abweichung zwischen dem technisch erzielbarem *Soll* und dem tatsächlich auftretenden *Ist*. Aus energetischer Sicht werden die Einbußen bezogen auf den Energiebedarf mit 5 % bis 30 % beziffert (Wilde, 2014). Die Ursachen für den erhöhten Energieverbrauch liegen meist bei Betriebsfehlern in der Gebäude- und Anlagentechnik sowie deren Automation (Fütterer et al., 2017).

Gleichzeitig sind Qualitätssicherungsprozesse im Gebäudebetrieb wenig etabliert und das Zusammenspiel zahlreicher Akteure wie z. B. Objektbetreibern, Dienstleistern und Nutzern erschwert diesen Prozess. Zusätzlich stellt die stetig zunehmende Komplexität der Gebäude und die Wechselwirkungen der Funktionen von Anlagen ein Hindernis für einen minimalen Energieverbrauch dar.

Ein Indikator hierfür ist die rapide wachsende Vernetzung im Zeitalter des Internet-of-Things (IoT) (Mauerer et al., 2018). Werden Anlagen- und Funktionsstörungen sowie Betriebsfehler im Lebenszyklus von Gebäuden nicht identifiziert und demnach nicht beseitigt, ist ein energieeffizienter Gebäude- und Anlagenbetrieb nicht gewährleistet. Das Ziel der Energieeffizienz im Gebäudebetrieb wird dann nur minderwertig und teilweise erfüllt.

MOTIVATION

Gebäude und Anlagen werden heute zunehmend komplexer. Die Vernetzung im Zeitalter des IoT nimmt stetig zu und die Anforderungen an Energieeffizienz und Nutzerkomfort steigen zunehmend (Waide et al., 2014). Die verschiedenen Einflüsse, wie zum Beispiel Witterung und Nutzerverhalten, machen den Einsatz zusätzlicher Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSRT) zur Erhaltung eines effizienten Anlagenbetriebs unabdingbar. Aus diesem Grund verfügen moderne Nicht-Wohngebäude (NWG) in der Regel über eine Gebäudeleittechnik (GLT), welche die Sensor- und Aktordaten kontinuierlich erfasst. Diese GLT-Systeme generieren große Datenmengen, welche den Betrieb des Gebäudes widerspiegeln. Dadurch wird Aufschluss über die Funktionsweise des Gebäudes als Gesamtes, aber auch über einzelne Anlagen und Gewerke gegeben. Die heutigen Daten einer Leittechnik können Messwerte von Sensoren und Aktoren, z. B. Temperaturen, Volumenströme, Drücke oder Ventilstellungen in unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen (häufig sekundlich, minütlich, viertelstündlich, etc.) erfassen und speichern. Zudem werden Fehlermeldungen von Steuergeräten und Aktoren, wie z. B. Pumpen oder Ventilatoren erfasst.

Diese Daten fallen heute im Gebäudebetrieb massenhaft an, jedoch mangelt es an Strategien diese automatisiert auszuwerten und somit Rückschlüsse ziehen zu können. Insbesondere die Datenmenge und -vielfalt („Big Data“) stellt hohe Anforderungen an eine nachgelagerte Auswertung großer Betriebszeiträume. Im Sinne einer umfassenden, energetischen und funktionstechnischen Überprüfung von technischen Anlagen müssen größere Zeiträume ausgewertet und viele der vorhandenen Messkanäle miteinander kombiniert werden. Dabei werden schnell Datenmengen erreicht, für die klassische Auswerteverfahren und konventionelle Infrastrukturen an ihre Grenzen stoßen. Des Weiteren wird sich die bereits heutzutage schon große Datenmenge, in Zukunft noch weiter erhöhen und verdichten.

Für die Analyse von Betriebs- und Automationsdaten eignen sich Big Data Technologien bzw. Methoden der künstlichen Intelligenz. Im Folgenden werden daher die Rahmenwerkzeuge und Prozesse, welche zur Umsetzung dieser Analysen, bezogen auf Betriebsdaten die mittels der Gebäudeautomation aufgezeichnet wurden, detailliert beschrieben.

Zu diesem Zweck stehen die Bereiche Datenaufbereitung, Datenklassifikation, Merkmalsanalyse und Fehlererkennung gebäudetechnischer Anlagen im Fokus der Untersuchungen. Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist somit die Entwicklung von skalierbaren und automatisierten Lösungen zur Unterstützung der Minimierung von Performance Gaps, die durch diverse Mängel während der Planung, Errichtung und dem Betrieb von Gebäuden entstehen. Dadurch soll bestmöglicher Nutzerkomfort bei gleichzeitig hoher Energieeffizienz gewährleistet und ein Beitrag zur energetischen Betriebsoptimierung des Gebäudebestandes geleistet werden.

METHODIK VON BIG DATA ANALYSEN

Für die Analyse von Betriebs- und Automationsdaten werden Big Data Technologien ein großes Potential, insbesondere in der Zusammenarbeit mit unterschiedlichen Akteuren, welche für eine Sicherstellung der Betriebsperformance notwendig sind eingeräumt (Bitkom, 2012). Im Rahmen des Projektes wurde dafür ein algorithmischer Big Data Baukasten als informationstechnologisches Rahmenwerk entwickelt, mit dessen Hilfe sich verschiedene Fragestellungen rund um die Analyse von Betriebsdaten effizient beantworten lassen (Reiß et al., 2019). Um Prozesse handhabbar zu gestalten, wurde dieser Baukasten nach dem „Teile & Herrsche-Prinzip“ aufgebaut (siehe *Abbildung 1*). Für die Umsetzung wurden sowohl reale Betriebsdaten, die über die Gebäudeautomation von zwei großen NWG gewonnen wurden, als auch mittels dynamischer Gebäudesimulationsmodelle synthetisch erzeugte Betriebsdaten verwendet. Die Anwendung des Big Data Baukastens wurde im Rahmen der Forschungsarbeit in zahlreichen Experimenten aus den Bereichen Datenaufbereitung, Datenklassifikation, Merkmalsanalyse und Fehlererkennung der TGA demonstriert. Ziel des Forschungsvorhabens ist somit die Entwicklung von skalierbaren und automatisierten Lösungen zur energetischen Betriebsoptimierung des Gebäudebestandes.

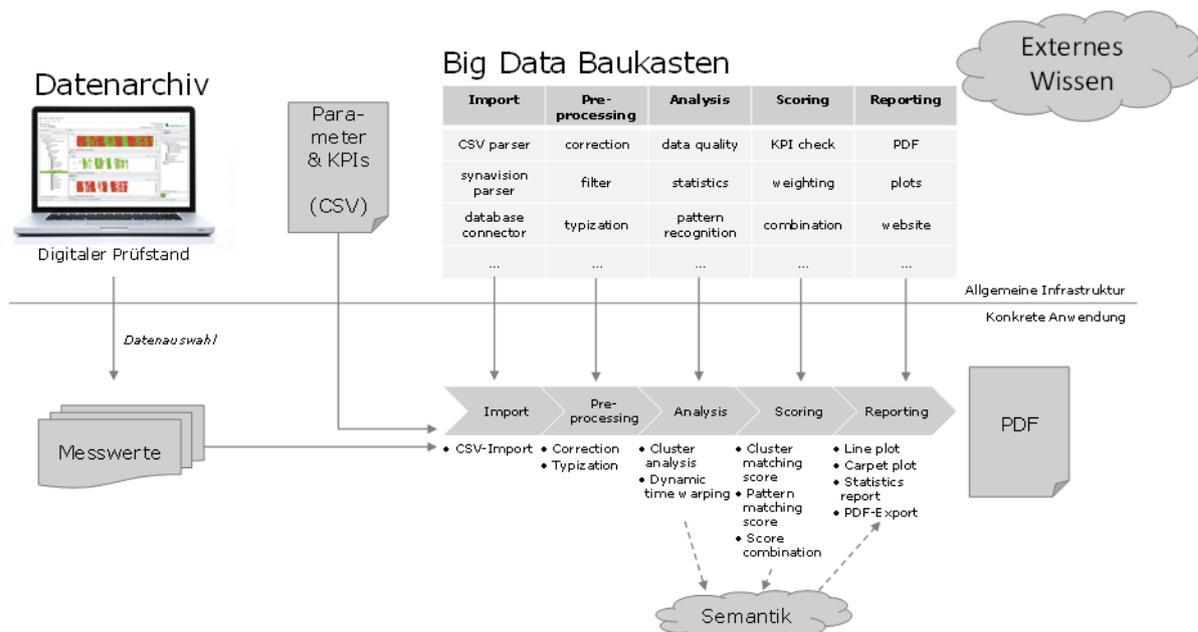


Abbildung 1: Überblick der Gesamtarchitektur im Projekt

Innerhalb des Baukastens sind Fragestellungen gezielt in algorithmische Lösungen zerlegt. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass komplexe Prozesse, die darüber hinaus stets automatisierbar sein müssen, handhabbar werden. Der Baukasten setzt sich aus einzelnen Baukastenelementen zusammen, welche sich den Kategorien Daten-Konnektivität, Vorverarbeitung, Analyse, Bewertung und Reporting zuordnen lassen (Entwicklungsebene 1 in *Abbildung 2*). Kombiniert und orchestriert werden einzelne Elemente zu Anwendungsszenarien zusammengestellt und bilden somit wiederverwendbare Module (Ebene 2). Innerhalb der Anwendungsebene (Ebene 3) erfolgt eine automatisierte Wissenserkenntnis und Merkmalsextraktion, indem die Verfahren auf reale Betriebsdaten angewandt werden.

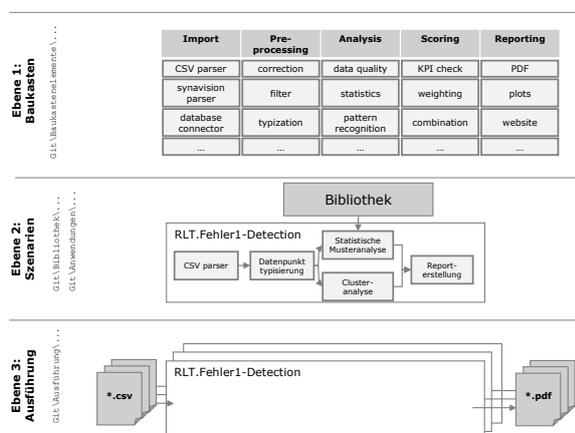


Abbildung 2: Entwicklungsebenen mithilfe des algorithmischen Big Data Baukasten

Die Entwicklung von Machine-Learning Modellen erfordert ein Training der Algorithmen mit einer großen Menge zu diesem Zwecke geeigneter Daten. Zu diesem Zweck wurden im Rahmen des Projektes neben realen Betriebsdaten, die über die Gebäudeautomation von zwei großen NWG gewonnen wurden, auch Simulationsdaten verwendet. Diese synthetischen Betriebsdaten wurden auf Basis von Gebäude und Anlagensimulationsmodellen erzeugt. Die detaillierte Modellierung von Gebäude- und Anlagentechnik inklusive Heizung, Lüftung, Kühlung und Beleuchtung mit allen relevanten Regelalgorithmen ermöglicht die realitätsnahe Abbildung des thermischen Verhaltens der Gebäude- und Anlagentechnik sowie deren Wechselwirkungen. Die Simulationsdaten repräsentieren synthetische Betriebsdaten sowohl zum korrekten als auch zum fehlerhaften Gebäude- und Anlagenbetrieb. Dies wird erreicht durch die gezielte Implementierung definierter Betriebsfehler.

Im Vergleich zu realen Betriebsdaten bietet diese Methodik den großen Vorteil, dass hinsichtlich der Verfügbarkeit und Vollständigkeit von Automationsdaten keine Einschränkungen bestehen. Durch die Simulationen kann die große Bandbreite an möglichen Szenarien im Gebäude- und Anlagenbetrieb abgebildet sowie unterschiedliche Merkmale in die virtuellen Datenquellen implementiert werden. Im Kontext der Simulationen wurde auch untersucht, welche Effekte einzelne Parameter auf den Gebäude- und Anlagenbetrieb haben und inwieweit sich Betriebsfehler auf den Energiebedarf auswirken können.

EXPERIMENTELLE ANWENDUNG VON BIG DATA ANALYSEN

Die Analysen wurden an Betriebsdaten aus realen Nicht-Wohngebäuden durchgeführt, welche durch die in der Gebäudeautomation integrierte Speicherfunktion abrufbar waren. Diese integrierte Speicherung der Betriebsdaten ist in den häufigsten NWG gegeben. Andernfalls sind Datenlogger als Software- oder Hardwarelösung zum Nachrüsten verfügbar, z. B. erreichbar über das BACnet Protokoll (Kranz, 2013). Da die Schnittstellen hier jedoch sehr heterogen und proprietär sind, wurde der *Digitale Prüfstand* der synavision GmbH eingesetzt, um die Verbindung unterschiedlicher Gebäude zu vereinheitlichen und zu vereinfachen (siehe *Abbildung 1*). Neben den realen Betriebsdaten wurde der Betrieb gebäudetechnischer Anlagen auch mittels dynamischer Simulationen modelliert, die den Vorteil bieten zielführend und schnell unterschiedliche (Fehler-)szenarien abzubilden.

Entwicklung synthetischer Betriebsdaten

Im Rahmen dieses Projektes werden virtuelle Daten durch die simulationstechnische Abbildung von typischen Bürogebäuden und der dazugehörigen Anlagentechnik sowie Automation erzeugt. Durch die dynamisch-thermischen Gebäude- und Anlagensimulationen in *IDA Indoor Climate and Energy (ICE)* werden unterschiedliche Varianten zur Energieerzeugung, -verteilung, und -übergabe erstellt. Typische Anwendungsbereiche des Modellierungs- und Simulationswerkzeuges *IDA-ICE* sind die Simulation von Innenraumklima und den dafür benötigten Energieströmen in Gebäuden, basierend auf der Modellierung und Simulation der Gebäudesubstanz, als auch der Anlagentechnik. Zusätzlich zu dem thermischen Verhalten der Gebäude und deren Räume werden auch die MSRT einschließlich der Hydraulik für Heizung, Lüftung, Kühlung sowie die Beleuchtung durch Kunst- und Tageslicht simuliert. Ein parameterbasierter Modellaufbau ermöglicht dabei eine breite Variation verschiedener Einflussfaktoren auf den Gebäude- und Anlagenbetrieb und erlaubt Untersuchungen, die im realen Gebäudekontext schwer oder nicht darstellbar sind. Dementsprechend ergeben sich durch den Einsatz von synthetischen Betriebsdaten aufgrund der möglichen Bandbreite an Parametervariationen Vorteile für das Training von Machine-Learning Algorithmen gegenüber realen Betriebsdaten. Durch diesen simulationsbasierten Prozess werden synthetische Betriebsdaten für den korrekten und fehlerfreien Betrieb sowie mittels implementierter Betriebsfehler für Fehlerfälle generiert.

Beim Aufbau des Gebäudemodells wurde ein typisches Bürogebäude, welches den Durchschnitt dieser NWG-Kategorie in Deutschland abbildet, modelliert. Das Referenz-Gebäudemodell basiert auf den normativen Grundlagen eines Referenz-

Büroraums, der durch 20 Zonen ($\approx 20.25 \text{ m}^2$ für ein 2 Personenbüro mit hoher Belegungsdichte nach DIN V 18599-10) und unterschiedlicher Orientierung auf Gebäudemastab ($405.0 \text{ m}^2 \text{ NF}$) skaliert wird. Der weitere Aufbau des Modells orientiert sich ebenfalls an den Randbedingungen des Nutzungsprofils für Gruppenbüros nach DIN V 18599-10. Im Fokus der gesamtheitlichen Untersuchungen stehen die Anlagentechnik und deren Automation, weshalb Bürogebäude mit einem entsprechenden technischen Ausstattungsgrad gewählt werden. Qualitätssicherungsmaßnahmen für die Energieeffizienz von Gebäuden wie technisches Monitoring oder umfangreiche Funktionen der GA werden, erst ab einer entsprechenden Baualterklasse eingesetzt. Deshalb orientiert sich der Energiestandard an einer entsprechenden Baualterklasse und für das Gebäudemodell werden die bauphysikalischen Kennwerte der EnEV 2009 für die typischen Konstruktionsaufbauten zu Grunde gelegt. Die Bereitstellung der Heizenergie zur Raumwärmeversorgung und zur Konditionierung der Zuluft in den Heizregistern der Raumlufttechnischen (RLT) Anlage erfolgt mittels Gasbrennwertkessel. Sowohl die Wärmeerzeuger als auch die Wärmeabgabesysteme in Form von statischen Heizkörpern wurden auf Basis der Heizlastberechnung nach DIN EN 12831 dimensioniert. Die mechanische Lüftung ist als Teilklimaanlage (TKA) modelliert und ist mit den thermodynamischen Luftbehandlungsfunktionen *heizen, kühlen, entfeuchten* für die Konditionierung zur Zu- und Abluftversorgung der Büroräume verantwortlich. Die modellierte RLT-Anlage orientiert sich an der TGA im Bereich Raumlufttechnik des VDI-Mustergebäudes nach VDI 6009-1 und ist daher als TKA ausgeführt. Nach (Werner, 2008) werden in Büro- und Verwaltungsgebäuden Teilklimaanlagen dreimal so häufig wie Vollklimaanlagen eingesetzt.

Die fehlerhaften Datensätze werden anhand konkreter Betriebsfehler (siehe Abschnitt „Fehlerkatalog“) wie z. B. Abweichung von definierter Soll-Zulufttemperatur, defektes Regelventil, Über-/unterschreitung der Betriebszeiten, Offset Zuluft-Temperaturfühler generiert. Unter fehlerhaft wird hierbei, eine Abweichung vom definierten Normbetrieb, verstanden. Diese Abweichungen können in unterschiedlicher Charakteristik (z. B. Zeitpunkt, Intensität, Dauer, etc.) auftreten, sodass diese dynamische Variabilität auch bei der Modellierung berücksichtigt ist. Durch diese Variation unsicherer Randbedingungen entsteht eine Vielzahl an Simulationen mit Datensätzen, die den fehlerhaften Betrieb repräsentieren. Unter anderem werden die synthetischen Daten zum Entwickeln und Trainieren von Machine-Learning Algorithmen für den Big Data Baukasten verwendet. In diesem Kontext wurden die simulationstechnisch

abzubildenden Datenpunkte an die in der Praxis verfügbaren Datenpunkte angepasst. Diese Anpassung vermeidet ein unerwünschtes Trainieren der Algorithmen auf Abhängigkeiten zwischen virtuellen Datenpunkten aus den Simulationen und realen Datenpunkten aus der GLT.

Anwendungsbeispiel: Klassifikation und semantische Anreicherung

Das Wissen um die Semantik eines Datenpunktes ist die Eingangsvoraussetzung für weitere automatisierte Verfahrensschritte und somit der erste elementare Baustein in der Vorverarbeitung.

Ein vielversprechendes Verfahren zur Klassifikation unbekannter Sensor- und Aktordaten ist das *Deep Learning* (Goodfellow et al., 2016). Die Idee hierbei ist es, ein Modell auf Basis bekannter und bereits klassifizierter Daten zu trainieren, um anschließend das trainierte Modell für die Klassifikation unbekannter Sensor- und Aktordaten zu nutzen. Deep Learning basiert dabei auf *künstlichen neuronalen Netzen* (Kruse et al., 2015), die wiederum aus sogenannten *Neuronen* und deren Verbindungen zueinander bestehen. Sie bilden ähnlich dem menschlichen Gehirn, je nach erlerntem Kontext, gewichtete Verbindungen zwischen den Neuronen aus. *Abbildung 3* zeigt ein neuronales Netz, das die viertelstündigen Messwerte eines Tagesausschnitts einer Zeitreihe verarbeitet und ausgabeseitig eine Klassifikation in die vier untersuchten physikalischen Einheiten vornimmt. Hierbei handelt es sich um die Demonstration einer Grobklassifikation. Die Gesamtheit der Datenpunkte, die für die Analyse der Performance notwendig sind, wird in eine Klassifikationsstruktur eingeteilt. Mithilfe dieser Taxonomie können Datenpunkte exakt beschrieben werden. Dafür wurden die Klassen *Einheit*, *Medium*, *System*, *Subsystem*, *Komponente* und *Ort* eingeführt. Neben einer Grobklassifikation wurde auch eine Feinklassifikation durchgeführt, die zusätzlich zur Einheitenklassifikation eine Unterscheidung nach dem Ort (Einbauort) vorsieht. Am Beispiel des Datenpunkttyps Temperatur bedeutet dies, dass das neuronale Netz trainiert wird, um Vorlauf- von Rücklauftemperaturen oder Luft- von Wassertemperaturen zu unterscheiden. Im Rahmen des Forschungsdemonstrators wurden verschiedene neuronale Netze zur Klassifikation erprobt. Dabei wurden drei verschiedene Netzwerkarchitekturen des Deep Learnings implementiert.

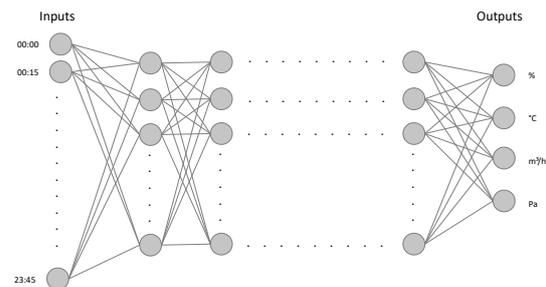


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines neuronalen Netzes zur Klassifikation von Datenpunkten nach Einheiten

Das beschriebene Beispiel zur Grobklassifikation wurde mit ca. 48.000 wöchentlichen Samples aus RLT-Anlagen des realen Gebäudebetriebs trainiert (Lebert, 2019). Die Probe und Klassifikation erfolgte mit jeweils ca. 4.000 wöchentlichen Samples aus Realdatensätzen, die jedoch nicht Teil des Trainings waren.

Die Deep Learning Verfahren erzielten während der durchgeführten Experimente bereits in einfachen Konfigurationen gute bis sehr gute Ergebnisse (siehe Abschnitt „Ergebnisse und Diskussion“). Um die Eignung abschließend zu beurteilen, müssten jedoch weitere Experimente mit deutlich größeren Datenmengen durchgeführt sowie darüber hinaus Optimierungen der Verfahren implementiert werden, um eine Überanpassung der Modelle durch zu hohen oder zu geringen Variantenreichtum zu verhindern. Größere Datenmengen können beispielsweise über synthetische Daten durch eine dynamische Simulation erreicht werden. Der Einsatz der synthetisch erzeugten Zeitreihendaten zum Training von maschinellen Lernalgorithmen wurde zudem anhand des Random Forest Algorithmus geübt und evaluiert.

Die Zeitreihenverläufe, aus denen nach dem Abruf aus der Gebäudeautomation zu Anfang lediglich Werte und Zeitstempel als Informationen verfügbar waren liegen nun typisiert und mit semantischen Informationen angereichert vor. Diese sind, nach einer für Gebäudebetriebsanalysen geeigneten Taxonomie, klassifiziert und somit für eine Weiterverarbeitung mittels computergestützter Methoden verarbeitbar. Weitere Anwendungsbeispiele, die im Zuge des Projektes an realen Anlagen praxisnah erprobt wurden, werden im Folgenden kurz erläutert.

Fehlerkatalog:

Dieses kategorische Bewertungssystem dient als Erfassungsmatrix. Dabei werden Fehler nach Kategorien der DIN EN 15232 gewerkegetreu zugeordnet. Zudem können den katalogisierten Fehlern energetische Auswirkungen und die Häufigkeit des Auftretens zugeordnet werden. Mithilfe dessen kann ein Prioritätsindex abgeleitet werden. Weiterhin werden Fehlern entsprechende Handlungsempfehlungen zugeordnet, die wiederum

die Grundlage für einen entsprechenden Feedback-Mechanismus darstellt (Wussler, 2018).

Merkmalsidentifikation:

Dabei werden typische Merkmale zum Beispiel als Aktivitätsprofil für eine Schnittmenge an Daten durch eine Normwoche beschrieben. In diesem Zuge werden viele Wochen überlagert und für jeden Zeitpunkt einer Normwoche eine Aktivitätsmaßzahl abgeleitet.

Automatisierte Fehlererkennung:

Mittels der Komposition eines sogenannten *150%-Modells* einer RLT-Anlage können die Betriebsmodi eines Systems und deren Zulässigkeit bewertet werden. Dabei wird das System RLT in seine n Subsysteme (Vorerhitzer, Kühler, Befeuchter, etc.) zerlegt. Ein Subsystem kann dabei einen Zustand "An" oder "Aus" annehmen. Das System (z. B. RLT) kann demnach 2^n Systemzustände annehmen, die jeweils nur "Zulässig" oder "Unzulässig" sein müssen. Zusammen mit den Baukastenelementen Datenpunkttypenerkennung und Merkmalsidentifikation können die Systemzustände und somit ein fehlerhafter Betrieb für jeden Zeitpunkt automatisiert hergeleitet werden.

ERGEBNISSE & DISKUSSION

Datenpunkttypenerkennung durch Algorithmen des maschinellen Lernens

Aus den Untersuchungen zur Datenpunkttypenerkennung durch Deep Learning Verfahren ist hervorgegangen, dass die Effektivität der Klassifikation signifikant von der Anzahl der zur Verfügung stehenden Samples je Klasse abhängig ist. Je mehr Datenpunkte für das Training zur Verfügung stehen desto bessere Ergebnisse liefern die Algorithmen. Des Weiteren wurde festgestellt, dass die Ausgeglichenheit des Trainingsdatensatzes von großer Bedeutung ist. Dies lässt sich daran festmachen, dass die Raten korrekt klassifizierter Klassen bei häufig auftretenden Datenpunkten höher sind als die der selten vorkommenden Klassen. Insgesamt wurden die häufig vertretenen Datenpunkte der Klassifikationsebene „Einheit“ mit einer True-Positive-Rate (TPR) von 70-97 % erkannt, während Klassen mit geringerer Datengrundlage zum Trainieren eine TPR von 40 % definitiv richtig klassifizierten Datentypen erreicht haben.

Das Training der neuronalen Netze zur Unterscheidung von Temperaturen, die an verschiedenen Orten innerhalb von Anlagen gemessen werden, wie z. B. Zuluft- und Ablufttemperaturen, erzielte korrekt vorhergesagte Klassifikationsraten von maximal 69 %. Daher werden für die Erkennung der Datenpunkte in dieser feineren Aufschlüsselung empfohlen die Verfahren weiter zu optimieren, um die Ergebnisse zu steigern. Potential zur Optimierung bietet beispielsweise die semantische Dekomposition der vorhandenen Informationen. Durch diese Dekomposition, beispielsweise des Zeitstempels in

Wochentag, Monat, Jahreszeit oder etwa des Sonnenauf- und untergangs wird der semantisch nutzbare Kontext für die Analyse zusätzlich angereichert. Die natürliche Struktur der Deep Learning Verfahren eignet sich hierfür in besonderem Maße, da sich die Klassifikation von abstrakten Merkmalen hin zu konkreten Sensor- und Aktortypen verfeinern lässt. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde die grundsätzliche Eignung der Verfahren demonstriert.

Energetische Auswirkungen von Betriebsfehlern

Neben der Bereitstellung der virtuellen Datenquellen werden die Simulationen auch zur Analyse von Stellschrauben im Gebäudebetrieb und zur Bewertung der Auswirkungen von Betriebsfehlern auf den Energiebedarf verwendet. Hierbei soll der Einfluss einzelner Betriebsparameter auf den Gebäude- und Anlagenbetrieb untersucht werden. Als Zielgrößen werden die jeweiligen Komponenten der RLT-Anlagen bzw. deren in Wechselwirkung stehenden Energieströme gewählt. Dazu zählen der durch die Wärmerückgewinnung (WRG) rückgewonnene Anteil an Wärme (Q_{WRG}), dem Luftvorerhitzer zugeführte Wärme (Q_{VE}), dem Luftkühler abgeführte Wärme (Q_{KUE}), dem Luftnacherhitzer zugeführte Wärme (Q_{NE}), die aufzuwendende Ventilatorarbeit (W_{Vent}), der raumintegrierten Heizung zugeführten Wärme (Q_{ZH}) für die Raumwärmeversorgung und die gesamte eingebrachte Wärme (Q_H). Anhand dieser Zielgrößen sollen einerseits die direkten Auswirkungen auf Bauteilebene und andererseits die indirekten Auswirkungen auf sekundäre Größen beurteilt werden.

Wie bereits in den vorangegangenen Beschreibungen erläutert, kann der korrekte Betrieb eine große Bandbreite an Betriebszuständen annehmen. In diesem Zusammenhang soll der Einfluss von unterschiedlichen Zulufttemperaturen auf die definierten Zielgrößen untersucht werden. Die untenstehende *Abbildung 4* zeigt daher beispielhaft die unterschiedlichen Nutzenergiebedarfe für den korrekten Betrieb der Referenz-Teilklimaanlage in Kombination mit der Variation der Zulufttemperatur in 0.5 K Schritten zwischen 18.0 °C und 22.0 °C. Diese Analyse kann aber auch als Energieeinsparpotential aufgrund von fehlerhaften Zulufttemperaturen angesehen werden und steht somit in Bezug zu dem Betriebsfehler „Unter-/Überschreitung der Soll-Zulufttemperatur“.

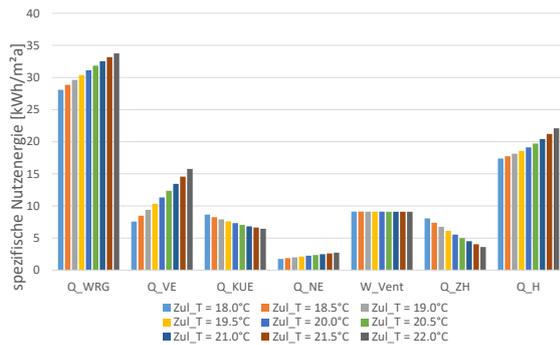


Abbildung 4: Einfluss der Zulufttemperatur auf den Nutzenergiebedarf

Erwartungsgemäß zeigt sich bei den definierten Randbedingungen der Simulationen die charakteristische Ausprägung aller Zielgrößen, mit Ausnahme der gleichbleibenden Ventilatorarbeit, eine Veränderung durch die Variation der Zulufttemperatur. Es lässt sich feststellen, dass mit steigender Zulufttemperatur der durch die WRG rückgewonnene Anteil an Wärme, die dem Luftvor- und Luftnacherhitzer zugeführte Wärme sowie die gesamt eingebrachte Wärme ansteigt. Im Gegensatz dazu sinkt sowohl die vom Luftkühler abgeführte Wärme als auch die durch die dezentrale Heizung zugeführte Wärme für die Raumwärmeversorgung. Das bedeutet, umso höher das von der RLT-Anlage bereitgestellte Temperaturniveau, desto weniger Energie müssen die Wärmeabgabesysteme in den Räumen aufwenden. Im Hinblick auf die gesamte Wärmemenge kann festgehalten werden, dass bei einer Erhöhung bzw. Senkung der Zulufttemperatur pro Kelvin im Bereich 18.0 – 22.0 °C eine Einsparung bzw. Mehrverbrauch von ca. 20 % bzw. 4.7 kWh/m²a Nutzenergie vorliegt.

Auf Basis dieser Betrachtung und den simulierten Energiebedarfen, welche grundsätzlich den korrekten Gebäude- und Anlagenbetrieb darstellen, kann bereits abgeleitet werden, wie groß der Einfluss auf den Performance Gap auch ohne Betriebsfehler sein kann. Darauf aufbauend rücken nun die Auswirkungen von Betriebsfehlern in den Fokus der Untersuchungen. Als exemplarischer Betriebsfehler wurde der im Realbetrieb identifizierte Betriebsfehler „gleichzeitiges heizen und kühlen“ modelliert und mit der unsicheren Randbedingung der Fehlerauftretsdauer simuliert. Bei dieser Betrachtung wurde als Referenz die Zulufttemperatur von 18.0 °C nach EnEV 2009 gewählt, um den Einfluss der Fehlerzeit untersuchen zu können. *Abbildung 5* zeigt die Ergebnisse der Zielgrößen für diesen Fehlerfall in Abhängigkeit der zeitlichen Ausprägungen für die in *Tabelle 1* aufgelisteten Fehlerzeiten und –dauern.

Tabelle 1: Zeitpunkte und Dauer der simulierten Betriebsfehler

FHL	BF-DAUER [UHRZEIT]	FHL	BF-DAUER [UHRZEIT]
_00	Di 10-12	_06	Werktags 12-13
_01	Werktags 10-12	_07	Fr. 16-18
_02	Di 10-12 & 15-17	_08	Mo, Fr 11-12 & 16-18
_03	Mo, Mi, Fr 10-12	_09	Di, Mi, Do 14-16
_04	Do 13-15	_10	Do, Fr 5-11
_05	Mi 10-17	_11	Täglich 5-18

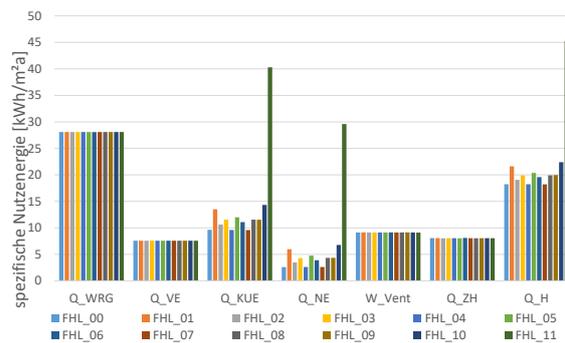


Abbildung 5: Einfluss des Betriebsfehlers „gleichzeitiges heizen und kühlen“ in Abhängigkeit der Fehlerauftretsdauer auf den Nutzenergiebedarf

Im Hinblick auf den energetischen Mehrverbrauch ist in diesem Szenario der dominierende Aspekt der Zeitraum in dem der Fehler auftritt. Grundsätzlich ergeben sich bei den Varianten an denen das gleichzeitige heizen und kühlen nur über ein paar wenige Stunden pro Tag oder Woche (alle bis auf FHL_11) auftritt, ähnliche Ausprägungen der Zielgrößen. Wie zu erwarten, sind auf Bauteilebene bei Wärmerückgewinnung, Luftvorerhitzer, Ventilator und dezentraler Heizung trotz auftretendem Fehler keine Auswirkungen erkennbar. Im Gegensatz dazu schwanken der Energiebedarf für Luftkühler und Luftnacherhitzer sowie die resultierende gesamte eingebrachte Wärmemenge in Abhängigkeit der jeweiligen Fehlerdauer. Vergleicht man bei der Zielgröße Q_H die beiden Varianten mit den kürzesten (FHL_00/ FHL_04/FHL_07) und den längsten (FHL_01/FHL_10) Fehlerzeiten so ergeben sich Abweichungen von ca. 5.0 kWh/m²a Nutzenergie bzw. 22 %. Daraus kann abgeleitet werden, dass bei den definierten Randbedingungen der Simulationen ein energetischer Mehrverbrauch von ca. 1.0 kWh/m²a bzw. 4.4 % pro Stunde in denen der Fehler auftritt, verursacht wird. Grundsätzlich können die Auftretswahrscheinlichkeit und der Zeitraum von Betriebsfehlern stark variieren, da Fehler teilweise an vereinzelt Tagen, mehrmals im Monat oder

lediglich einmal im Jahr auftreten können. In diesem Zusammenhang gibt es nur sehr begrenzt belastbare Literatur und keine zufriedenstellende Datengrundlage. Jedoch ist es als ein sehr realistisches Szenario anzusehen, dass im Fehlerfall der Betriebsfehler dauerhaft vorhanden ist. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit auch die Variante FHL_11 eingeführt. Hierbei wird davon ausgegangen, dass sobald die RLT-Anlage in Betrieb ist, der Betriebsfehler auftritt. Diese Betrachtung resultiert in einem extrem stark ansteigenden Energiebedarf bei Kühlregister, Nacherhitzer und gesamter eingebrachter Wärmemenge im Vergleich zum korrekten Betrieb der Basisvariante mit Zulufttemperatur von 18.0 °C. Wird die Betriebszeit mit der Fehlerzeit gleichgesetzt, so ergibt sich bei Kühlbedarf ein energetischer Mehrverbrauch von ca. Faktor 3, bei Heizwärmebedarf für das Nachheizregister ca. Faktor 5 und bei Heizwärmebedarf gesamt ungefähr Faktor 2. Diese Analysen zeigen eindeutig den hohen Einfluss des *Technical Gap* auf den gesamtheitlichen *Performance Gap* und untermauern die Notwendigkeit nach energetischen Qualitätssicherungsmaßnahmen im Gebäude- und Anlagenbetrieb.

ZUSAMMENFASSUNG & AUSBLICK

Mit der Baukastenstruktur steht ein geeignetes Rahmenwerkzeug bereit, um die Performance von Gebäuden auf kleinteilige Fragestellungen nach dem Teile & Herrsche-Prinzip herunterzubrechen. Mittels des Baukastens wurden Methoden und Algorithmen aus dem Bereich Big Data im Kontext des Gebäudebetriebs in konkrete Anwendungsszenarien überführt und praxisnah ausgeführt. Automatisierbare Methoden sind demnach ein großer Mehrwert, um ein technisches Monitoring digitalisiert zu unterstützen und den Mangel an ExpertInnen aufzufangen. Dafür bedarf es allerdings einen hohen Aufwand in der Implementierung, um auf viele technische Anlagen in Gebäuden generisch gültig zu sein.

Ein weiterer Schritt ist es neben Aussagen zur reinen Betriebsqualität, also die Auswirkungen auf Komfort und Energie, auch quantitative Bewertungen, also die Häufigkeit des Auftretens zu berücksichtigen.

Der Einsatz von Simulationsmodellen dient als virtuelle Datenbasis für die Generierung synthetischer Betriebsdaten für das Training von Verfahren des Maschinellen Lernens sowie deren Validationszwecken. Zusätzlich wurden durch die physikalischen und technischen Wirkzusammenhänge die Potentiale zur Energieeinsparung bzw. energetischen Mehrverbrauch durch die Variation unterschiedlicher korrekter Betriebszustände und Betriebsfehler quantifiziert.

Für weiterführende Forschungsaktivitäten in diesem Kontext sollte die Verwendung von stochastischen Gebäudemodellen unter Berücksichtigung von unsicheren Randbedingungen in Betracht gezogen werden. Hierbei könnte mit Monte-Carlo-Simulationen die große Bandbreite und dynamische Variabilität der Input-Parameter optimiert abgebildet werden. Dieser Prozess sollte sich wiederum positiv auf die Qualität der synthetischen Betriebsdaten, für das Entwickeln und Trainieren von Machine-Learning Algorithmen, auswirken.

DANKSAGUNG

Dieses Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 03ET1426 gemeinsam im Konsortium mit dem Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen der Technischen Universität München, Lehrstuhl für Software Engineering der RWTH Aachen Lehrstuhl, WILO SE, synavision GmbH und dem siz energie+ durchgeführt.

LITERATUR

- Bitkom Bundesverband Informationswirtschaft 2012. Telekommunikation und neue Medien e.V., Leitfaden: Management von Big-Data-Projekten, Bitkom.
- Correal, D., Gröschel, J., Möller, T., Neumann, S., Ruwinski, R. 2014. Energiemanagement für Bürogebäude. Leitfaden zur praktischen Einführung des Energiemanagements für Bürogebäude. Bericht Climate-KIC.
- Fisch, N., Plesser, S., et al. 2007. EVA - Evaluierung von Energiekonzepten für Bürogebäude. Schlussbericht, Forschungsprojekt, Institut für Gebäude und Solartechnik, Technische Universität Braunschweig
- Fütterer, J., Schild, T., Müller, D. 2017, Gebäudeautomationssysteme in der Praxis, Whitepaper ; RWTH-EBC 2017-001, Aachen, 2017, <http://dx.doi.org/10.18154/RWTH-2017-05671>
- Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. 2016. Deep Learning, The MIT Press.
- Kranz H. R. 2013. BACnet Gebäudeautomation 1.12: Grundlagen in deutscher Sprache, Cci-Buch Beraten + Planen, 3. Aufl. cci Dialog.
- Kruse, R., Borgelt, C., Braune, C., Klawonn, F., Moewes, C., Steinbrecher M. 2015. Computational Intelligence: Eine methodische Einführung in Künstliche Neuronale Netze, Evolutionäre Algorithmen, Fuzzy-Systeme und Bayes-Netze, Computational Intelligence Springer Vieweg.

- Lebert J. 2019. Implementierung eines Algorithmus zur Klassifikation von Gebäudeautomationsdaten, Masterarbeit, TU Braunschweig.
- Mauerer J. et al. 2018. Studie Internet of Things 2019, IDG Business Media GmbH.
- Reiß, D., Mehnert, J., Plessner, S., Hannen, M. 2019. An algorithmic module toolkit to support quality management for building performance, In: E3S Web Conf. 111, S. 5002. DOI: 10.1051/e3sconf/201911105002.
- Réhault, N., Lichtenberg, G., Schmidt, F. et al. 2014. ModQS – Modellbasierte Qualitätssicherung des energetischen Gebäudebetriebs, Forschungsbericht, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg
- Umweltbundesamt (Hg.). 2016. Klimaneutraler Gebäudebestand 2050. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimaneutraler-gebäudebestand-2050>.
- Waide, P., Ure, J., Smith, G., Nordass, B. 2014. The scope for energy and CO₂ savings in the EU through the use of building automation, Research Report, Waide Strategic Efficiency Ltd.
- Werner, P., Chmella-Emrich, E., Vilz, A. 2008. Folgen des Klimawandels: Gebäude und Baupraxis in Deutschland: BBR-Online-Publikation, Nr. 10/2008.
- Wilde P. de 2014. The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation, *Autom. Constr.*, vol. 41, pp. 40–49.
- Wussler M. 2018. Entwicklung eines kategorischen Bewertungssystems zur technisch-wirtschaftlichen Evaluation von Betriebsfehlern gebäudetechnischer Anlagen. Masterarbeit, TU Braunschweig.

Untersuchungen zu einer netzgeführten Taktstrategie für die Betonkerntemperatur einer Bürozone

J. Schäuble¹ und D. Bohne¹

¹Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, Hannover, Deutschland

KURZFASSUNG

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung einer netzgeführten Taktstrategie zur gezielten Betonkerntemperaturierung (BKT) für eine Bürozone, aufbauend auf dem Unknown-but-bounded-Verfahren (UBB). Für die Netzführung wurde ein Netzsignal, basierend auf dem momentanen Anteil von Wind- und PV-Strom im Netzgebiet, verwendet. Mit Hilfe einer gekoppelten Gebäude- und Anlagensimulation konnten die Auswirkungen der Betriebsstrategie auf Komfort, Energieverbrauch und Netzdienlichkeit analysiert werden. Das Modell wurde mit den Auslegungsdaten eines im Bau befindlichen Nichtwohngebäudes parametrisiert. Im Ergebnis zeigt sich, dass sich das elektrische Verbrauchsprofil von Erzeugung (reversible Wärmepumpe) und Verteilung im Hinblick auf das Netzverhalten mit der Taktbetriebsstrategie deutlich verbessern lässt. Diese Verbesserung wird "erkauft" durch einen leicht erhöhten Jahresendenergieverbrauch für die Wärme- und Kältebereitstellung. Der thermische Komfort kann mit der Taktstrategie in den Grenzen nach DIN EN 15251 (Klasse II) gehalten werden.

EINFÜHRUNG

Im Zuge der Energiewende und der damit verbundenen Integration fluktuierender, erneuerbarer Stromerzeugung kommt Gebäuden verstärkt eine Rolle als aktiver Verbraucher und Erzeuger von elektrischer Energie zu. Die Gebäudehülle kann dabei Flexibilität in Form von thermischer Speicherkapazität für das Energiesystem bereitstellen (Hausladen (2014)). In Verbindung mit einer (reversiblen) Wärmepumpe (WP) kann somit eine Betonkerntemperaturierung als Speicher zum netzgeführten Lastmanagement genutzt werden. Die Fähigkeit zur Anpassung der elektrischen Verbrauchs- und Erzeugungsprofile an die Netzanforderung kann mit dem Grid Support Coefficient (GSC) nach Klein et al. (2014) quantifiziert werden.

Das Unknown-But-Bounded-Verfahren (Gwerder et al. (2008)) ist ein Verfahren zur Auslegung und Dimensionierung von BKT-Systemen. Für das Verfahren wird in der Planung keine dynamische Simulation des Gebäudes benötigt, lediglich die Parameter des thermoaktiven Bauteilsystems (TABS) sowie maximale und minimale Schranken für interne

Tabelle 1: Parameter Architektur der modellierten Zone

U-Wert, Außenwände [W/m ² K]	0,13
U-Wert Dach [W/m ² K]	-
U-Wert Fenster [W/m ² K]	0,61
G-Wert Fenster [%]	50
Anteil verglaster Außenfläche [%]	27,1
Gesamtenergiedurchlassgrad Fenster inkl. Sonnenschutz [%]	20
Eff. spez. Wärmekap. ¹ [W h/m ² K]	63,64
Infiltrationsrate [1/h]	0,16
Wetterdaten Stuttgart,	2017 ²
Interne Lasten und Nutzungsprofile	Einzelbüro ³

thermische Wärmegewinne müssen angegeben werden. Das in Tödtli et al. (2009) vorgestellte Taktverfahren wurde in dieser Arbeit in Verbindung mit einem Netzsignal für den netzgeführten Taktbetrieb der Betonkerntemperaturierung verwendet. Ausgehend von der Basisauslegung wurde für diese Betriebsstrategie dann schrittweise der spezifische Auslegungsmassenstrom der Betonkerntemperaturierung in einer Parameterstudie erhöht. Als Grundlage für das Netzsignal wurden viertelstündliche Daten für den lokalen Anteil von Wind & PV des Netzgebiets TransnetBW aus dem Jahre 2017 verwendet. Hierfür liegen sowohl Prognosedaten als auch historische Daten beim Verband Europäischer Übertragungsnetzbetreiber (ENTSO-E(2020)) vor.

Das Simulationsmodell für Gebäudezone und Anlagentechnik wurde mit Hilfe von TRNSYS 18 (Beckmann et al. (2009)) aufgebaut, basierend auf den Planungsdaten (Architektur und TGA) eines in 2020 in Betrieb zu nehmenden Nichtwohngebäudes. Das Nutzerverhalten wurde mit stündlichen Lastprofilen basierend auf SIA 2024:2015 (2015) für den Zonentyp Einzel-/Gruppenbüro angenommen. Die Auswirkungen der entwickelten Betriebsstrategie sowie der Variation des BKT-Verteilmassenstroms auf Komfort, Netzeinfluss und Energieverbrauch der Bürozone werden schließlich untersucht und diskutiert.

MODELLIERUNG

Die Architektur der untersuchten Zone, in der sich im geplanten Gebäude drei Einzelbüros befinden, ist in

¹berechnet nach DIN EN ISO 13786:2018-04 (2018)

²DWD (2020)

³Belegung, el. Geräte, Lüftung nach SIA 2024:2015 (2015)

Tabelle 2: Parameter Anlagentechnik nach Planung (Leistungen und Volumenströme bezogen auf Zonen-Nettogrundfläche)

Heizleistung rev. Wärmepumpe [W/m ²]	30
Kälteleistung rev. Wärmepumpe [W/m ²]	39
Wasservolumen Speicher H [m ³]	0,25
Wasservolumen Speicher C [m ³]	0,25
RLT Zu-/Abluftvolumenstrom [m ³ /h m ²]	7
RLT Zulufttemperatur Heizbetrieb [°C]	18
Temperaturänderungsgrad WRG [%]	73
Zusatzheizsystem (Radiatoren) [W/m ²]	20
Strahlungsanteil Zusatzheizung [%]	40

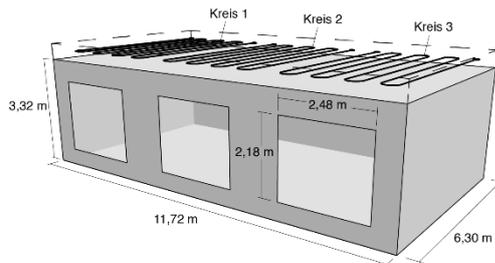


Abbildung 1: Isometrie der modellierten Zone inkl. Lage der Bauteilaktivierung, Südwest-Ausrichtung

Abbildung 1 sowie die zugehörigen Eckdaten in Tabelle 1 dargestellt. Die Geometrie der Zone wurde dreidimensional modelliert und über das Tool Trnsys3d importiert. Die Beleuchtung wurde als sich kontinuierlich anpassend hinsichtlich der Anforderungen für Bürozone modelliert. Der außenliegende Sonnenschutz wird in Abhängigkeit der am Fenstern anliegenden Strahlungsleistung mit festem Schaltpunkt und Hysterese (180W/m², Hysterese = 20W/m²) gesteuert. An die Untersuchungszone angrenzende Zonen werden als isotherm betrachtet. Die Rohre der Betonkerntemperierung sind in Mittellage eingebracht, der Aufbau der thermisch aktiven Zwischendecke ist in Tabelle 3 beschrieben. Die Anlagentechnik zur Beheizung und Grundkühlung ist nach dem Prinzipschema aus Abbildung 2 ebenfalls in TRNSYS modelliert. Es wurden dabei die Auslegungswerte nach Tabelle 2 zur Parametrierung verwendet. Die reversible Wärmepumpe dient im Simulationsmodell ausschließlich zur Versorgung der Betonkerntemperierung, es wurden die Leistungskennlinien aus der Planung sowie die spezifischen Dimensionierungsparameter nach Tabelle 2 angesetzt. Das Temperaturniveau des Erdreichs wurde vereinfacht mit festen Austrittstemperaturen für Heiz- und Kühlfall angenommen. Als thermisch flinkes Zusatzheizsystem kommt eine Radiatorenheizung mit Fernwärme als Wärmequelle zum Einsatz. Diese wird im Simulationsmodell als ideale Heizung mit festem Strahlungsanteil dargestellt. Eine detaillierte hydraulische Simulation des BKT-Rohrnetzes erfolgt nicht. Es werden lediglich die Parameter aus Tabelle 4 in Verbindung mit einem festen Gesamtwirkungsgrad der Umwälzpumpe BKT zur Ermittlung der elektrischen Leistung verwendet. Bei Änderung des Mas-

Tabelle 3: Schichtaufbau der modellierten BKT-Decke

Bodenbelag	
Widerstand [m ² Kh/kJ]	0,028
Zementestrich	
Dicke [m]	0,05
Dichte [kg/m ³]	2000
Leitfähigkeit [kJ/hmK]	5,04
Spez. Wärmekap. [kJ/kgK]	1
Luftschicht	
Widerstand [m ² Kh/kJ]	0,047
Stahlbeton 1 %	
Dicke [m]	0,125
Dichte [kg/m ³]	2400
Leitfähigkeit [kJ/hmK]	5,83
Spez. Wärmekap. [kJ/kgK]	1
Active layer	
Verlegeabstand [m]	0,15
Außendurchmesser Rohr [m]	0,02
Dicke Rohrwand [m]	0,002
Leitfähigkeit Rohrwand [kJ/hmK]	1,26
Stahlbeton 1 %	
Dicke [m]	0,125
Dichte [kg/m ³]	2400
Leitfähigkeit [kJ/hmK]	5,83
Spez. Wärmekap. [kJ/kgK]	1

Tabelle 4: Parameter Rohrnetz bei $\dot{m} = 9 \frac{\text{kg}}{\text{hm}^2}$ für die drei parallelen hydraulischen Kreise

	Kreis 1	Kreis 2	Kreis 3
Rohrlänge [m]	140	133	126
Druckverlust je Kreis [Pa]	11218	9860	8556
Druckverlust gesamt [Pa]	←	14239	→
Massenstrom [kg/h]	180	172	163
Aktive Fläche [m ²]	20,9	20	19
Widerstandsbeiwert [Pa/m ² h]	62294	57425	52513

senstroms wird die resultierende Leistungsänderung nach den Ähnlichkeitsgesetzen

$$\frac{P_{1,hyd}}{P_{2,hyd}} = \left(\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2}\right)^3$$

ermittelt. Es findet eine zentrale Lufterwärmung mit Wärmerückgewinnung und Nacherhitzung im Heizfall statt, außerhalb der Betriebszeiten der Bürozone werden die Luftvolumenströme auf 10 % des Auslegungsvolumenstroms reduziert. Eine aktive Kühlung der Zuluft wird nicht modelliert. Das Pre- und Postprocessing der TRNSYS-Simulationen wurde mit Hilfe der freien Programmiersprache Python (Python Software Foundation(2020)) und sowie zugehörigen Bibliotheken aus demScipy-Universum (Virtanen et al. (2020)) durchgeführt.

NETZSIGNAL & BETRIEBSSTRATEGIEN

Basis- und Taktbetriebsstrategie nach UBB-Verfahren

Als Basisstrategie und damit als Referenz für die untersuchten netzgeführten Taktstrategien wurde die außentemperaturgeführte Vorlauftemperaturregelung nach dem UBB-Verfahren verwendet. Für dieses

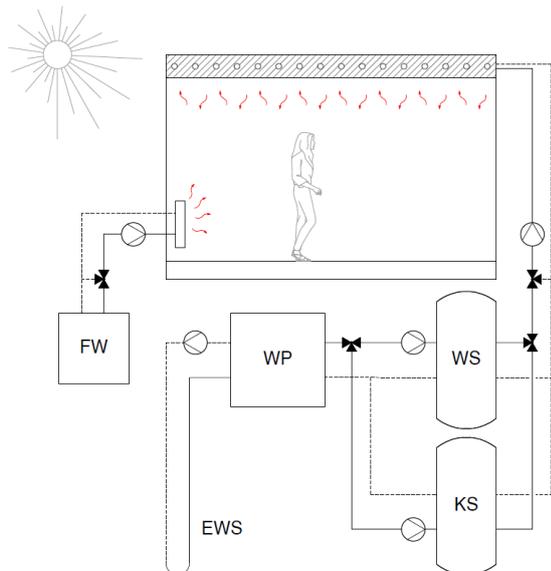


Abbildung 2: Anlagenschema der modellierten Betonkerntemperierung und statischen Heizung

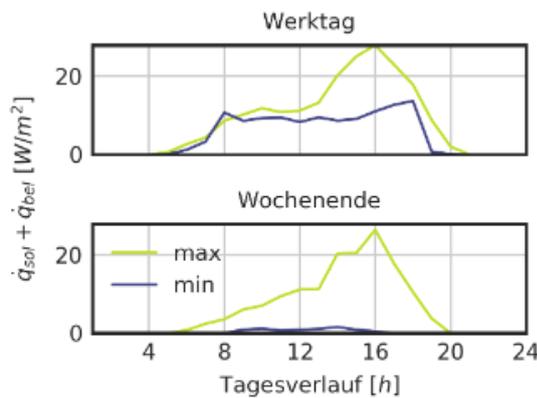


Abbildung 3: Simulierte spezifische Wärmegewinnsschranken für Beleuchtung und solare Einstrahlung

Verfahren muss keine dynamische Anlagensimulation durchgeführt werden. Lediglich die üblichen, bekannten Planungsparameter für Raum sowie thermisch aktives Bauteil sowie die oberen und unteren Grenzen der Wärmegewinne durch interne und solare Lasten müssen als Eingangsgrößen für das zugrundeliegende stationäre Modell bekannt sein.

Für die Ermittlung der Heiz-/Kühlkurven in der Basisstrategie wurden die simulierten Lastprofile für solare Wärmegewinne und interne Lasten durch Beleuchtung nach Abbildung 3 verwendet. Auch die Gewinn-/Verlustschranken zur Berücksichtigung der Belüftung würden in der Simulation ermittelt. Weiterhin wurden die Lastprofile für Geräte und Beleuchtung nach SIA 2024 angenommen (50% / 100% als unter bzw. obere Gewinnschranke). In der Basisvariante wird die Vorlauftemperatur in die Betondecke nach dem UBB-Verfahren in Abhängigkeit der (in der Praxis zu prognostizierenden) mittleren Außentemperatur des laufenden Tages bestimmt. Die BKT-Ladepumpe wird in dieser Basisvariante 24 h pro Tag betrieben. Darauf aufbauend werden drei

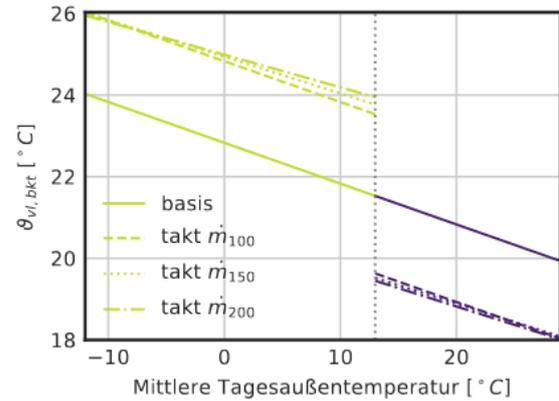


Abbildung 4: Ermittelte Heiz-/Kühlkurven nach dem UBB-Verfahren für Basis- und Taktvarianten

Taktvarianten mit unterschiedlichen spezifischen BKT-Massenströmen untersucht. Es ergeben sich folgende Strategien in der Übersicht:

basis Dauerbetrieb mit außentemperaturgeführter Vorlauftemperaturregelung nach UBB-Verfahren und $\dot{m} = 9 \frac{kg}{hm^2}$,

takt m₁₀₀ netzgeführter Taktbetrieb mit $\dot{m} = 9 \frac{kg}{hm^2}$,

takt m₁₅₀ netzgeführter Taktbetrieb mit $\dot{m} = 13.5 \frac{kg}{hm^2}$,

takt m₂₀₀ netzgeführter Taktbetrieb mit $\dot{m} = 18 \frac{kg}{hm^2}$,

Durch die Erhöhung des Massenstroms in den Taktvarianten werden kürzere Einschaltzeiten und damit eine gezieltere Beladung des Betonkerns in im Hinblick auf die Netzdienlichkeit günstigen Zeiten möglich. Der spezifische Massenstrom bewegt sich dabei mit flächenbezogenen Massenströmen zwischen 9 und 18 kg/hm² (bezogen auf die Netto-Grundfläche) im praxisüblichen Auslegungsbereich. Für jede der Taktvarianten ergibt sich, ausgehend von der Basisvariante, jeweils eine tägliche Einschaltdauer für den Heiz- sowie Kühlbetrieb nach den Gleichungen 1 und 2. Die Umschaltung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb erfolgt tageweise, ebenfalls basierend auf der mittleren prognostizierten Tagesaußentemperatur (Heizgrenze 13°C). Nach Festlegung der maximalen/minimalen Vorlauftemperaturen im Heiz- bzw. Kühlbetrieb kann die Taktbetriebszeit Δt_1 pro Tag anhand folgender Gleichungen ermittelt werden (Tödtli et al. (2009)):

$$\Delta t_{1,H} = \frac{\Delta t}{1 + \frac{R_t}{R_t + \bar{R}} (\theta_{vl,H,takt} - \theta_{vl,H})} \quad (1)$$

$$\Delta t_{1,C} = \frac{\Delta t}{1 + \frac{R_t}{R_t + \bar{R}} (\theta_{vl,C} - \theta_{vl,C,takt})} \quad (2)$$

Hierbei sind:

Δt Dauer der Taktperiode (24 h),

- $\vartheta_{vl,H,takt}$ maximale Vorlauftemperatur im Heizbetrieb (festgelegt auf 26°C),
- $\vartheta_{vl,C,takt}$ minimale Vorlauftemperatur im Kühltaktbetrieb (festgelegt auf 18°C),
- R_t Gesamtwiderstand des thermisch aktiven Bauteils sowie
- \tilde{R} Gesamtwiderstand des untersuchten Raums, ermittelt mit TABSDesign (Siemens Schweiz AG (2009)) nach Planungsparametern.

Die maximalen / minimalen Vorlauftemperaturen $\vartheta_{vl,H,takt}$ bzw. $\vartheta_{vl,C,takt}$ wurden mit 26°C / 18°C nah an der Sollraumtemperatur gewählt, um die Robustheit durch Ausnutzung des Selbstregelleffektes zu erhöhen. In Tabelle 5 sind die sich ergebenden

Tabelle 5: Betriebszeiten Heiz-/kühlfall nach UBB-Verfahren für die untersuchten Betriebsvarianten

	basis	takt	takt \dot{m}_{150}	takt \dot{m}_{200}
		\dot{m}_{100}		
$\Delta t_{1,H}$ [h/d]	24,0	8,5	7,5	7,0
$\Delta t_{1,C}$ [h/d]	24,0	13,5	11,0	10,0

Einschaltzeiten der Varianten, jeweils in Heiz- und Kühlobetrieb, aufgeführt. Es wird deutlich, dass zur Gewährleistung des Raumkomforts eine längere Beladungszeit im Kühlobetrieb nötig ist. Die nötige tägliche Beladungszeit in den Taktvarianten reduziert sich mit Erhöhung des Massenstroms um 1,5 h / 18 % (Heizbetrieb) bzw. 3,5 h / 26 % (Kühlobetrieb).

Grid Support Coefficient (GSC)

Die Netzdienstlichkeitskennzahl GSC nach Klein et al. (2014, 2016) stellt eine dimensionslose Kennzahl zur Bewertung des Netzeinflusses eines Gebäudes oder einzelner Anlagenteile dar. Sie berechnet sich nach Klein (2017) für wie folgt:

$$GSC_{abs}(G) = \frac{\sum_{i=1}^n W_{el}^i \cdot G^i}{W_{el} \cdot \bar{G}} [-] \quad (3)$$

mit

- G^i Wert der Netzreferenzgröße für Zeitschritt i
- W_{el}^i elektrischer Energieverbrauch je Zwitschritt,
- \bar{G} arithm. Mittelwert der Netzreferenzgröße im betrachteten Zeitraum

Als Netzreferenzgröße G können beispielsweise

- der Anteil von Wind- und PV-Strom im Netz,
- die Residuallast oder
- der EEX-Preis

für den jeweiligen Zeitschritt verwendet werden. Ein höherer Wert für GSC (>1) eines elektrischen Verbrauchers zeigt somit beispielsweise für die Referenzgröße Wind- & PV-Anteil an, dass das Lastprofil dem erneuerbaren Erzeugungsprofil ähnlicher ist und daher als günstig ("netzdienstlich") zu bewerten ist. Die elektrische Energie wird in diesem Fall mehrheitlich

zu Zeiten mit hohem Anteil von Wind- und PV-Strom im Netz bezogen. Zeitschrittweite, Betrachtungsobjekt, untersuchter Zeitraum sowie die Netzreferenzgröße sind flexibel wählbar.

In der Arbeit wurde der relative Anteil von Wind- & PV-Strom am gesamten Erzeugungsaufkommen des lokalen Netzbetreibers TransnetBW als Referenzgröße verwendet, da diese Größe der Zielsetzung einer Anpassung des Verbrauchs an die erneuerbare Erzeugungsleistung entgegen kommt. Zudem sind für die Anwendung der Betriebsstrategie wichtige Prognosedaten für diese Größe verfügbar (viertelstündlich als Day-ahead-Werte, ENTSO-E (2020)). Theoretisch ist, je nach Entwicklung der wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen, jedoch auch eine Anwendung bspw. des EEX-Preises als Referenzgröße problemlos möglich.

Zur Bewertung der Betriebsstrategien werden im weiteren Verlauf die täglichen, monatlichen und jährlichen GSC-Werte für

$P_{erz+vert}$ Lastprofil aus der Summe der an der Wärme-/Kälteerzeugung sowie -verteilung beteiligten Komponenten aus Abbildung 2: Primär-/Sekundärpumpen WP, Verdichter WP, Ladepumpe BKT

sowie

P_{ges} Lastprofil aus der Summe aller elektrischen Verbraucher im Simulationsmodell: Elektrische Geräte im Raum, Ventilatoren, Beleuchtung in-klusive $P_{erz+vert}$

nach Gleichung 3 ermittelt und dargestellt.

Entwickeltes Netzsignal

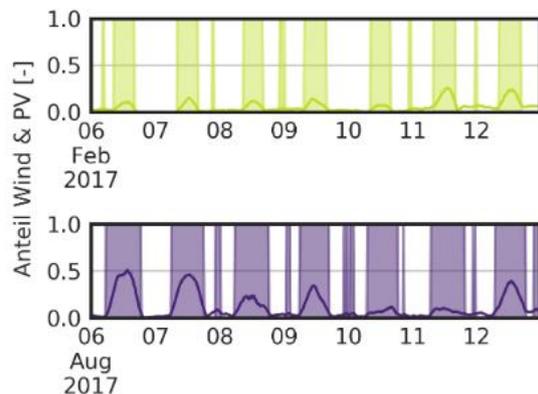


Abbildung 5: Beispiel für die Generierung des Netzsignals der BKT-Pumpe in Taktvariante \dot{m}_{100} (Oben: Heizbetrieb, Unten: Kühlobetrieb)

Mit dem entwickelten Netzsignal soll die tägliche Betriebszeit der BKT-Ladepumpe nach Tabelle 5, dienach dem UBB-Verfahren zur Erhaltung des Komforts ermittelt wurde, im Sinne der Netzdienstlichkeit auf den jeweiligen Tag verteilt werden. Das Ergebnis dieser Maximierungsaufgabe ist beispielhaft in Abbildung 5 für die Taktvariante \dot{m}_{100} dargestellt (Betriebszeiten der Ladepumpe farbig hinterlegt). Erkennbar sind weiterhin die kürzeren täglichen Be-

Tabelle 6: Jahressummen der Unterschreitung bzw. Überschreitung des Komfortbereichs nach DIN EN15251 für die untersuchten Varianten

	basis	takt \dot{m}_{100}	takt \dot{m}_{150}	takt \dot{m}_{200}
Komfortunterschreitung [Kh]	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4
Komfortüberschreitung [Kh]	0	8,6	14,2	19,5

Tabelle 7: Jahresmittelwerte GSC Erzeugung + Verteilung sowie Gesamtstromverbrauch (nur Werktage berücksichtigt)

	basis	takt \dot{m}_{100}	takt \dot{m}_{150}	takt \dot{m}_{200}
GSC _{erz+vert}	0,97	1,70	1,85	1,92
GSC _{ges}	1,46	1,56	1,59	1,61

triebszeiten im Heizbetrieb (oben) sowie die ausgeprägte Mittagsspitze des Anteils von Wind&PV im Sommer. Der Signalverlauf für die Ansteuerung der BKT-Ladepumpe für den jeweiligen Tag kann somit mit Hilfe der Prognosedaten für die mittlere Außentemperatur sowie mit der Prognose des Verlaufs der Netzreferenzgröße bestimmt werden.

ERGEBNISANALYSE & DISKUSSION

Thermischer Komfort

In Abbildung 6 sowie anhand der Daten in Tabelle 6 wird deutlich, dass die operative Raumtemperatur im Großteil des Jahres zwischen den Komfortgrenzen nach DIN EN 15251:2012-12 (2012) gehalten werden kann. In der Basisvariante wird das Komfortband nach unten (im Heizfall) sowie nach oben (im Kühlfall) am besten ausgenutzt. Ausreißer der Raumtemperatur in der Übergangszeit bei mittleren Außentemperaturen werden durch den hohen Selbstregeleffekt aufgrund geringerer Übertemperaturen nahezu vollständig vermieden. In den Taktvariantentreten hier leichte Überhitzungen auf, die sich jedoch mit einer maximalen jährlichen Abweichung von knapp 20 K h deutlich innerhalb des in DIN EN 15251 gegebenen Toleranzbereichs befinden.

Netzdienlichkeit

In Abbildung 7 wird deutlich, dass die Monatsmittelwerte für GSC_{erz+vert} in der Basisvariante ganzjährig im netzneutralen Bereich (GSC \approx 1) liegen. Bei den Taktvarianten ist eine deutliche Verbesserung der Netzdienlichkeitskennzahl GSC_{erz+vert} für das Lastprofil von P_{erz+vert} ablesbar. Die Erhöhung des Massenstroms zwischen den Taktvarianten wirkt sich insbesondere im Kühlfall in den Sommermonaten positiv auf die Netzdienlichkeit aus. In Tabelle 7 werden die Auswirkungen der Taktbetriebsstrategie

auf den jährlichen GSC deutlich: Die Optimierung der elektrischen Lastprofile für Erzeugung und Verteilung bewirkt eine deutliche Erhöhung der jährlichen Netzdienlichkeitskennzahl GSC_{erz+vert}. Auch beim Wert für GSC_{ges} und damit der Betrachtung des Lastprofils aller elektrischer Verbraucher im Modell, wird eine Erhöhung um circa 7 % bzw. 10 % (Taktvarianten \dot{m}_{100} bzw. \dot{m}_{200}) erreicht.

In Abbildung 8 wird das Speicherpotenzial der Betonkerntemperierung im untersuchten Fall der Büronutzung aufgezeigt. Durch die Verwendung erhöhter Temperaturdifferenzen bzw. Massenströme kann die pro Tag eingespeicherte Energie in den Taktvarianten nahezu aufrecht erhalten werden. Die Energiemengen innerhalb der Taktvarianten unterscheiden sich noch einmal geringer. Die hohe Übereinstimmung zwischen den einzelnen Punkten für die jeweilige Tagesenergie (und damit der Regressionsgeraden) zwischen Takt- und Basisvarianten bestätigen dabei die Robustheit des UBB-Verfahrens.

Energieverbrauch

In Abbildung 9 sind die Auswirkungen der Betriebsstrategien auf den Endenergieverbrauch elektrisch für BKT-Ladepumpe ("vert"), Erzeugung "erz h/c", sowie den Nutzenergieverbrauch zur Lufterhitzung durch die Zusatzheizsysteme (RLT-Nacherhitzer & Radiatoren, "ideal h") dargestellt. Die Taktbetriebsvariante \dot{m}_{100} weist demnach gegenüber der Basisvariante einen höheren Wärmebedarf für das Zusatzheizsystem sowie höhere Endenergieaufwände für die reversible Wärmepumpe auf. Diese Erhöhung des Nutzenergiebedarfes ist bei der zusätzlichen Einspeicherung in kürzeren Zeitfenstern erwartbar. Ursache ist die in Abbildung 6 sichtbare breitere Streuung der operativen Raumtemperaturen bei den Taktvarianten. Zusätzlich wird der Selbstregeleffekt durch die erhöhten Temperaturdifferenzen zwischen Wasserseite und Raum verringert. Diese negativen Effekte verstärken sich bei den Taktvarianten \dot{m}_{150} und \dot{m}_{200} .

Die den Endenergiemengen für die Erzeugung zugrundeliegenden Jahresarbeitszahlen (JAZ) der Wärmepumpe blieben nahezu unverändert (JAZ_H \approx 4, JAZ_C \approx 7) bei Veränderung der Betriebsstrategie. Die Einsparungen bei der Pumpenenergie der Verteilpumpe bei Taktbetriebsvariante \dot{m}_{100} fallen (gegenüber der Basisstrategie) vergleichsweise gering aus und werden bei Erhöhung des Auslegungsmassenstroms bei den weiteren Taktvarianten wieder aufgezehrt.

ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Mit Hilfe einer gekoppelten Gebäude- und Anlagensimulation wurde eine Betriebsstrategie zur netzgeführten Beladung der Betonkerntemperierung mit reversibler Wärmepumpe als Wärme-/ Kälteerzeuger untersucht. Grundlage für das Modell waren die Planungsdaten eines im Bau befindlichen Nichtwohn-

gebäudes. Für die Betriebsstrategie wurde der im UBB-Verfahren beschriebene Taktbetrieb mit einem auf Basis des momentanen Anteils von Wind- & PV-

Strom generierten Netzsignal kombiniert. Innerhalb

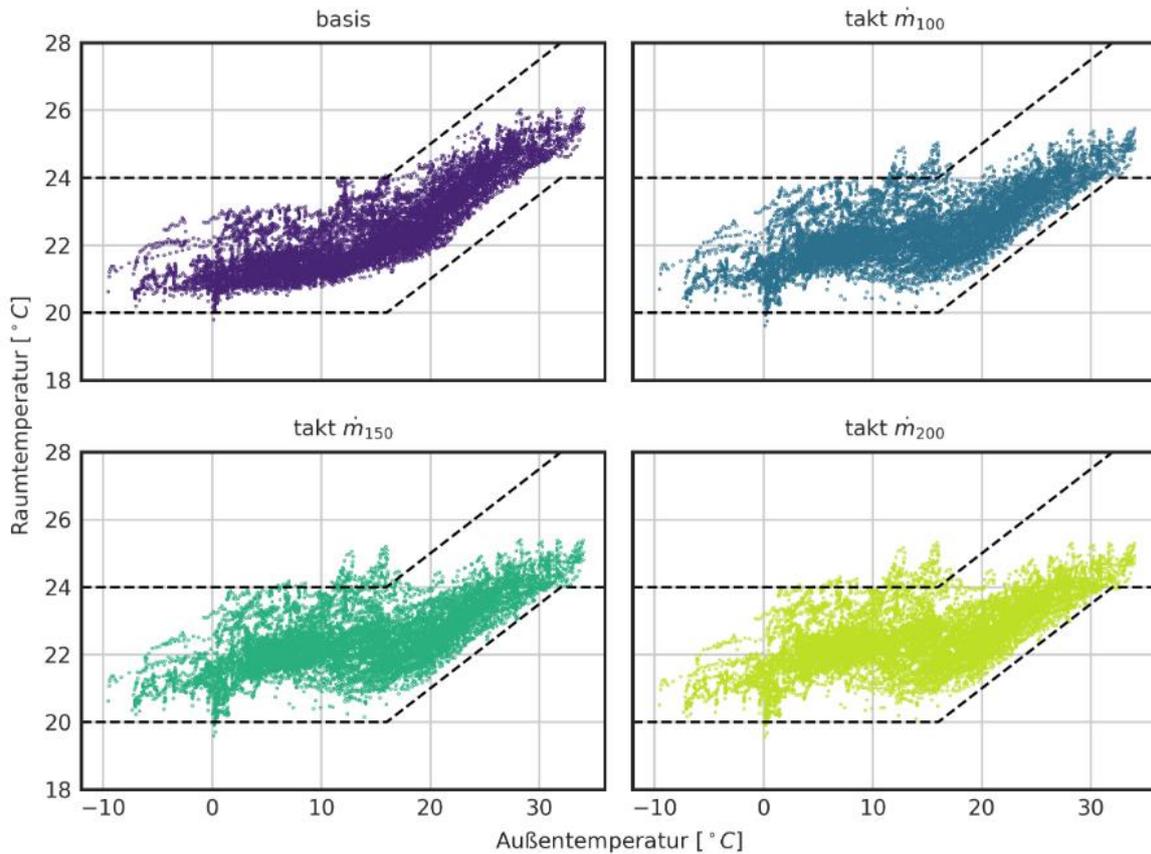


Abbildung 6: Simulierte operative Raumtemperatur über Außentemperatur innerhalb der Bürobetriebszeiten sowie Komfortbereich nach DIN EN 15251 (gestrichelte Linien)

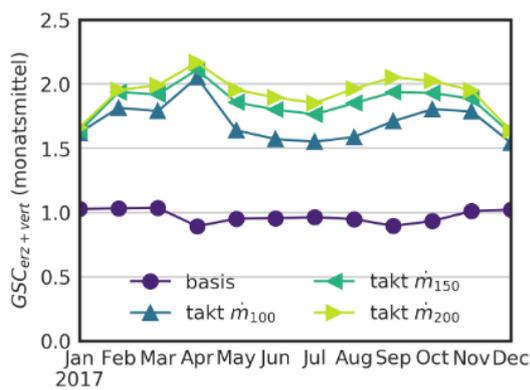


Abbildung 7: Monatlicher Netzdienstlichkeitskoeffizient der Varianten für Verteilung und Erzeugung (nur Werktage)

dieser Taktstrategie wurden daraufhin die Auswirkungen einer Erhöhung des Auslegungsmassenstroms im BKT-Kreis untersucht. Im Resultat konnte durch die Anwendung der Taktstrategie die Netzdienstlichkeit auch bei gleichbleibendem BKT-Massenstrom deutlich erhöht werden. So konnte der jährliche Netzdienstlichkeitskoeffizient für die Wärme- und Kältebereitstellung (von ca. 1 auf 1,7) erhöht werden.

Die netzdienliche Beladung, ausschließlich in Zeiten mit hohem Anteil von Wind- und Solarstrom, verursachte einen leicht erhöhten jährlichen

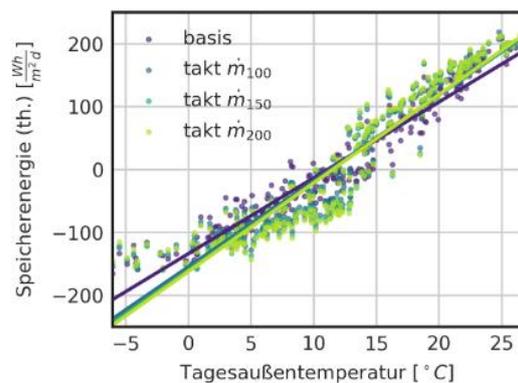


Abbildung 8: Tageswerte der eingespeicherten Nutzenergie über mittlerer Tagesaußentemperatur je Variante mit Regressionsgeraden (nur Werktage)

Endenergieverbrauch für die Bereitstellung von Wärme und Kälte (16 auf 19,5 kWh/m²a). Die thermische Komfortklasse der Untersuchungszone konnte konstant gehalten werden. In Verbindung mit

gut verfügbaren Prognoseelementen, wie der mittleren Außenlufttemperatur des aktuellen Tages sowie dem prognostizierten Anteil von Wind- und PV-Strom im Netzgebiet, konnte eine einfache und effektive Strategie für die netzgeführte Beladung einer Betondecke für eine Bürozone aufgezeigt werden. Eine dynamische Simulation in der Planungsphase ist

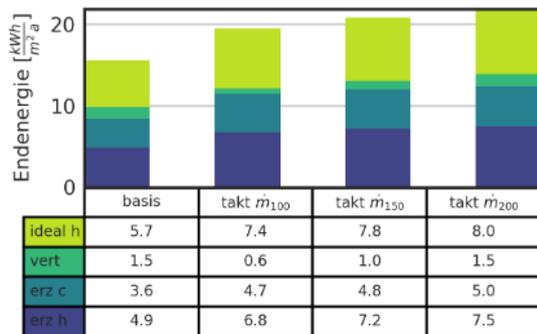


Abbildung 9: Ermittelte Endenergiemengen für die einzelnen Varianten

hierfür durch die Verwendung des robusten, stationären UBB-Verfahrens nicht unbedingt nötig, was den potenziellen Einsatzbereich vergrößert.

DANKSAGUNG

Das diesem Beitrag zugrunde liegende Forschungsprojekt "EnOB: EltStore – Einfluss der technischen Planung für Nichtwohngebäude auf die Nutzung von volatilen Strom aus regenerativer Erzeugung unter Verwendung elektrochemischer Speichersysteme" wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET1500A gefördert. Die Autoren danken dem Mittelegeber für die Unterstützung und dem Projektträger Jülich (PTJ) für die Betreuung des Vorhabens.

LITERATUR

- Beckmann, W., J. Duffie, und S. Klein (2009). TRN-SYS – a transient system simulation program.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2012). Eingangparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2018). Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen - Dynamisch-thermische Kenngrößen-Berechnungsverfahren (ISO13786:2017); Deutsche Fassung EN ISO 13786:2017.

DWD (2020). Deutscher Wetterdienst: CDC (Climate Data Center).

ENTSO-E (2020). Entso-e transparency platform.

Gwerder, M., B. Lehmann, J. Tödtli, V. Dorer, und F. Renggli (2008, 07). Control of thermally-activated building systems (tabs). Applied Energy 85, 565–581.

Hausladen, G. (2014). Lastverhalten von Gebäuden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bauweisen und technischer Systeme Speicher- und Last-managementpotenziale in Gebäuden.

Klein, K. (2017). Quantifying the grid support of building energy systems - Evaluation of grid-supportive concepts for space heating and cooling in non-residential buildings. Ph. D. thesis, Karlsruhe Institut für Technologie.

Klein, K., M. Hermann, und S. Herkel (2016). Gebäude als netzdienliche Wärmespeicher: Anforderungen an die Gebäude der Zukunft. Bautechnik 93(1), 1–7.

Klein, K., D. Kalz, und S. Herkel (2014). Netzdienlicher Betrieb von Gebäuden: Analyse und Vergleich netzbasierter Referenzgrößen und Definition einer Bewertungskennzahl. Bauphysik 36(2), 49–58.

Python Software Foundation (2020). Python language reference, version 3.7.

SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (2015). SIA 2024: Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik (SNR 592024:2015).

Siemens Schweiz AG (2009). Tabsdesign www.faktor.ch/tabs-tool.html.

Tödtli, J., V. Dorer, M. Gwerder, B. Lehmann, und F. Renggli (2009). TABS Control. Steuerung und Regelung von thermoaktiven Bauteilsystemen. Faktor Verlag.

Virtanen, P., R. Gommers, T. E. Oliphant, M. Haberland, T. Reddy, D. Cournapeau, E. Burovski, P. Peterson, W. Weckesser, J. Bright, S. J. van der Walt, M. Brett, J. Wilson, K. Jarrod Millman, N. Mayorov, A. R. J. Nelson, E. Jones, R. Kern, E. Larson, C. Carey, I. Polat, Y. Feng, E. W. Moore, J. Vand erPlas, D. Laxalde, J. Perktold, R. Cimrman, I. Henriksen, E. A. Quintero, C. R. Harris, A. M. Archibald, A. H. Ribeiro, F. Pedregosa, P. van Mulbregt, und S... Contributors (2020). SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python.

V: Modelling and simulation on urban scale

SYSTEMATIC RECOGNITION OF DATATYPES AND RESOLUTIONS FOR DEFINING THE DEPTH OF DISTRICT AND BUILDING LEVEL RETROFITS

A. Malhotra¹, S. Zuhair¹, J. Frisch¹ and C. van Treeck¹

¹Institute of Energy Efficiency and Sustainable Building (e3D), RWTH Aachen University, Aachen, Germany

²Buildings Performance Institute Europe (BPIE), Berlin, Germany

ABSTRACT

With the upsurge in the energy demand in Europe, the challenge to improve the existing building stock's energetic performance calls out for a district and building level intervention through retrofitting measures. Often the amount and type of data required for the retrofit interventions are unclear, and it leaves the decision-makers in a dilemma within the development of low to high quality models based on its value as perceived by stakeholders. There exists a lack of robust indicators that could guide the EU member states to channelise their resources in reducing energy consumption based on the input data for simulation at district and building level. In this paper a QFD (Quality Function Deployment) model is developed to study the relationships between the stakeholder interests as outputs and different input datatypes and requirements, based on the level of detail, for simulation (physical, operational, environmental, geometrical and contextual data) that could impact the optimal model development. Keeping in mind the inadequacy of coherent computational models and informing the users about the implications of acquiring different data, here, the input datatypes, their interaction and collection are simplified to a greater extent through the proposed approach.

INTRODUCTION

The EU member states are responding to global climate and energy challenges with ambitious energy policy. Central to the current policy is a commitment to the EU '20-20-20' targets: a 20% cut in greenhouse gas emissions, a 20% reduction in energy use through energy efficiency improvements and a 20% share of renewable energy deployment in 2020 (Lucha, et al., 2016). According to the 2030 framework for climate and energy policy of the European Commission (Gröger, et al., 2012), a key objective of the future climate and energy policy is to keep energy affordable for domestic and non-domestic consumers. But from a physical point of view, the challenge for urban planners, architects and scientists is to model the environment replicating the demands of the different consumers at district and building level. Though building energy models cannot be expected to capture the full complexity of real buildings and system performance, the amount and type of input data available do make a substantial difference in the outputs of these models and consequently affecting the

decision-making significantly by these stakeholders. These models are often developed by technical teams using simulation tools in low, medium or high quality based on the application and purpose (Li B., 2017). These vary based on reliability, usability, complexity, and availability of the simulation tool. Within the retrofit value chain, the requirements of various stakeholders vary and moreover, for their satisfaction, the schedules and resource constraints must be clearly understood (Gooding & Mehreen, 2016). Hence, the information requirements for developing simulation models must be specified in detail.

According to a report (German Environmental Agency 2020), the working group on Energy Balance's latest country assessment found, that in Germany 14 percent less primary energy was used in 2019 than in 1990 making it much difficult to achieve its national energy efficiency target of 20 percent within 2020. Moreover, in order to reach the 2050 target of 50 percent, a constant reduction of 2 percent per year 2020 onwards is required. Whereas, it is still expected to meet its 2030 renewable energy target of 30 percent, although Germany's renewable energy lobby warns the country might miss that goal too. To reduce the risk of failures and underestimation of energy targets, a crucial prerequisite could be demand side analysis using the urban scale simulations. Furthermore, Building Performance Simulation (BPS) of urban scale and building level models using a higher level of detail of the available data is of considerable potential that can provide the ability to dynamically quantify and compare the performance attributes of a proposed model in a realistic manner and at relatively lower costs and effort. Although, using available data efficiently and for the required purpose is still an area to be developed.

Decision-making approaches and tools such as AHP (Analytic Hierarchy Process) (Ereeş, et al., 2013), BIM (Building Information Modelling) (Berard & Karlshøj, 2011), BEMS (Building Energy Modelling Systems) (Senave & Boeykens, 2015) and GIS (Geographical Information Systems) (Bolstad, 2005) modelling require diverse input data to process retrofit measures. Both data-driven models and physical models are used for predicting different types of benefits at district and building levels, but both have

their limitations (Li, et al., 2017). There exist several tools like CitySim (Robinson, et al., 2009), CityBES (City Building Energy Saver) (Chen, et al., 2017) and UMI (Urban Modelling Interface) (Reinhart, et al., 2013) that focus on estimating the impact of retrofitting by utilising the physical and data-driven models. The categorisation of the input information and its implications on the outputs have been significantly characterised as uncertainties in simulation by the research community (Macdonald, et al., 1999). However, this categorisation has not been studied extensively from the point of view of stakeholders interests and, therefore, presents a big gap in understanding the impact of stakeholder's requirements upon decision making for energy retrofits by reducing associated costs and risks.

District and building level retrofits massively influence the overall energy demand of a country (Sebi, et al., 2018), however, often there is a constant struggle in outlining the required input data for simulation to predict the demand and the accuracy that can be achieved with the available data. The level of analysis is invariably different from case to case and, thus, a systematic and methodical recognition of the required input datatypes, quality and quantity, to make decisions can save drastic amounts of resources in planning and development phases. In the next section, the dataflow in simulation of district and building level is discussed with the existing focus of the industry. Furthermore, the input data requirements and its depth are elaborated in detail.

DATAFLOW IN SIMULATIONS

Based on the best practices in the industry for developing, validating and using simulation models for decision-making, a range of general issues that affect the input and output accuracy in results are (i) model definition, (ii) model purpose and its use, (iii) model evaluation and (iv) challenges in using the model (Kuntz, et al., 2013). As it can be seen in Figure 1 for achieving better accuracy in simulation model for retrofits, a higher level of quality and precision in input data is required whereas this requirement is reduced if the retrofit depth is considered shallow or medium.

Extending over the domain of different applications, input information available for district and building level simulations adheres to different modelling standards. These standards treat the data-flow based on the concept of Levels of Detail/Development (LODs) such as stated in CityGML (Gröger, et al., 2012) and BIM modelling standards (Reinhart, et al., 2013). CityGML, an open XML based modelling standard, has gained popularity in many different applications for storage, processing and exchange of virtual 3D city models.

In context of the domain of Building Energy Management Systems (BEMS) and BPS, CityGML,

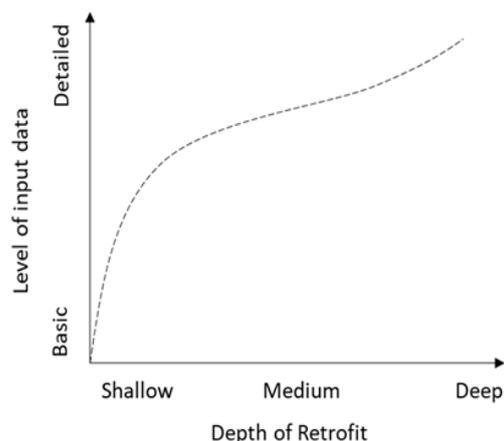


Figure 1: Model input data relationship with depth of retrofit

when coupled with energy specific information extension, is a useful modelling language for energy specialists to deal with large sets of information, setting up district level simulations and visualisations for decision-making. CityGML is based on several standards from the ISO 191xx family, the Open Geospatial Consortium, the W3C Consortium, the Web 3D Consortium, and OASIS (Gröger, et al., 2012). Depending on the details of the different modelled objects, five consecutive Levels of Detail (LOD) are differentiated both over the geometrical and thematic properties. The concept of LOD also enables the visualisation of different attributes related to different buildings. As shown in Figure 2, LOD0 is essentially a two and a half dimensional Digital Terrain Model over which an aerial image or a map may be draped, and buildings are represented by their footprint only. LOD1 is the well-known blocks model comprising prismatic buildings with flat roof structures. LOD2 has differentiated roof structures and thematically differentiated boundary surfaces. In LOD3 architectural models with detailed wall and roof structures – potentially including doors and windows – are provided and LOD4 is mainly composed of rooms, interior doors, stairs, and furniture.

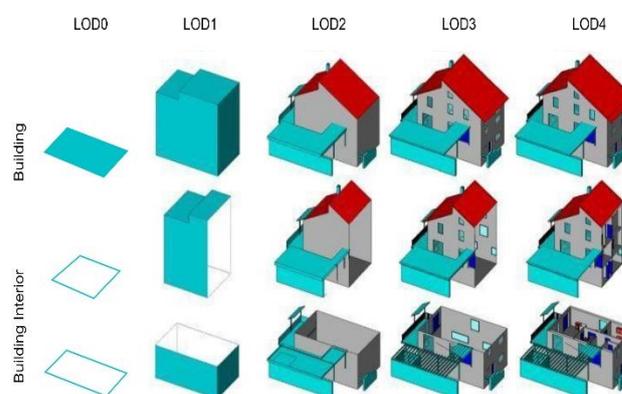


Figure 2: Levels of detail (LODs) in CityGML (Gröger et al., 2012).

The Energy Application Domain Extension (Energy ADE) for CityGML data model has been implemented to enable the urban planners and researchers to store and manage energy-related data at urban scale such as energy demands, time series data, user occupancy and further data for energy retrofit simulations and decision-making (Agugiario, et al., 2018). With the increasing popularity throughout the information modelling community and with the vision to be widely accessible for different applications, simulations and analysis, CityGML does require some additional features and attributes to be more useful. Since it is a wide-domain modelling standard, there exist gaps in the recognition of key input data that are important for the energy and retrofitting analysis and communication to the decision-makers. In this paper, a few attributes from different LODs are considered to formulate the stakeholder's requirements at district level analysis such as geographic information, building typologies, year of construction, district heating/cooling networks, etc.

Similarly, BIM can be understood as an information system where product data is stored and used for supporting decision making in Architecture, Engineering and Construction (AEC) processes (Berard & Karlshøj, 2011). It is being used as a collaborative and communication tool to avoid conflicts in projects. BIM application standards outline the Level of Development (LODs) (i.e. attribute to be attached to an element) to be followed for modelling buildings, assigning the attributes and their analysis. The fundamental specification definitions are provided based on AIA BIM protocol document G202-2013 for LOD 100, 200, 300, 400 and 500 (Reinhart, et al., 2013). The purpose of this definition is to make the model authors or further co-operators aware of what the models can be relied on and for what it was originally intended for. In LOD100, model elements are graphically represented but do not have any attached information. LOD200 has additional information attached to the element such as size, orientation and approximate quantity. Further, in LOD300, the model element is a specific system and it has accurate quantities over the details in LOD200. LOD400 and 500 represent a higher level of information that can be used for fabrication, assembly, installation and are field verified (as build). However, there also exists other classification systems based on the Level of Geometry, Information, Coordination and Logistics (LO-GICL) and these range from LoG0 to LoG5 (van Treeck, et al., 2016).

Although BIM models are highly detailed, they do not necessarily ascertain the filtration of data required for building energy modelling (BEM) which was not their prime purpose while development. Generally, BIM data is exported to other building energy simulation tools as the integration of BEM is not yet fully implemented (Senave & Boeykens, 2015) and they require rigorous work before being used by a static or dynamic simulation tool. In an attempt to standardise

the information exchange between BIM and BEM a method was recently developed using Information Delivery Manual (IDM) and Model View Definition (MVD) methodologies (Pinheiro, et al., 2018). Industry Foundation Classes (IFC) based schema translated the requirements for BIM and BEM. The LODs support new construction but there is a lack in the development of LODs for retrofits and using the models for iterative workflows addressing energy efficiency along with other aspects of cost, structure, sustainability and others.

There is consistent guidance available for energy modellers for district and building levels (Reeves, et al., 2015; Lilis, et al., 2018; ASHRAE, 2018), however, it is quite vague with respect to the target stakeholders. The absence of built-in interactions between decision-makers and technical teams is one of the barriers in effective utilisation of simulation models (BPIE, 2018). In order to bridge this barrier, based on the different level of detail/development simulation input data categorisation and their relationships with stakeholder requirements, an overview and application of Quality Function Deployment (QFD) method for this purpose is presented in the next sections.

QFD AND ITS APPLICATIONS

One of the main tools that have been regarded as very successful in meeting the requirements of customers has been QFD (Akao, 1997). QFD is meant to translate the needs of stakeholders into technical requirements of a process or product development in a systematic manner. Though, it has been used for various other applications. In building construction, it can be used to focus on the needs of the stakeholders to deliver and coordinate their requirements (Pheng, & Yeap, 2001) and for other applications such as building integrated photovoltaic (BIPV) design (Paul, et al., 2010). It has also been used for the development of software along with a wide range of problem areas in the architecture and construction industry (QFD Institute, 2011). The basic QFD 'House of Quality' (see Figure 3) is the tool that drives the process using a relationship matrix where a client requirement is related to design options so that quality can be achieved for valuable characteristics. A basic House of Quality (HOQ) comprises six main parts. The client's interests and their importance rating are given by the client. The design requirements are the set of alternatives available for the client and a co-relation matrix describes their relationship with each other. The main part of the HOQ is the relationship matrix where the relevant design requirements can be linked with the client's interests. Often, the stakeholders have real issues in retrofit projects connected with quality, budget and time. Determining the quality of input data for model development for district or building retrofits using these relationships can enhance the interaction of tools and their usage and as a result, can assist in the decision-making based on the specific interests of the stakeholders (e.g. thermal energy demand, carbon

emissions). Therefore, in this study an application framework is developed based on the QFD approach to bridge the gap of built-in interaction between the stakeholder interests and which input data, required for model development, must be focused on by the technical teams.

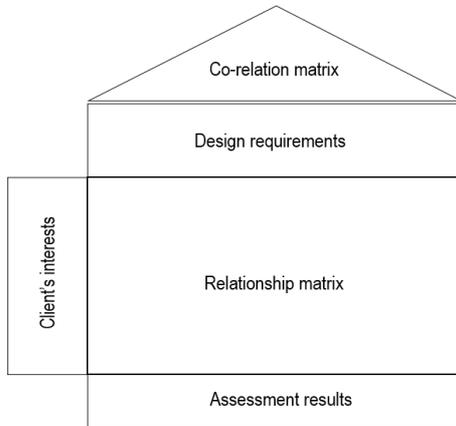


Figure 3: A QFD House of Quality.

METHODOLOGICAL APPLICATION FRAMEWORK

The presented framework aims to outline the selection process of the input simulation data through the deployment of the QFD approach in district and building retrofit while developing simulation model. It would help in planning and requirement of resources for data collection and using it for model development. The developed HOQ in Figure 4 has five major parts (i) stakeholders interests, (ii) input data requirements, (iii) importance rating to the stakeholder interests, (iv) relationship between stakeholder interests and input data requirements, and (v) technical assessment results. Initially, a simple HOQ has been taken where a useful extension of importance ratings to stakeholder interests is added and the co-relation matrix is omitted due to a large number of requirements.

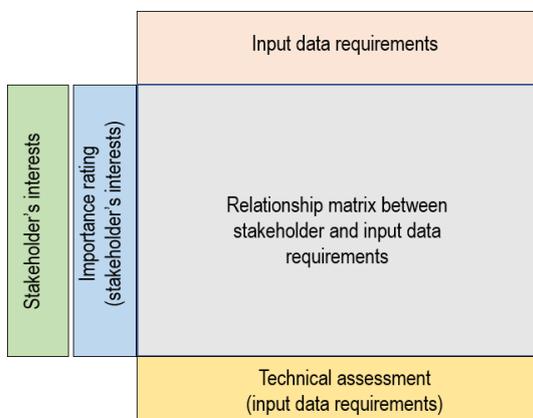


Figure 4: QFD for systematic recognition of input data

A HOQ can be used for assessing the input data requirements in terms of basic or detailed information and decision-maker (stakeholders) interests as shown in Figure 4 to address the specific needs by providing requirement specification for input data. It can also be highly useful for aligning the data requirements and utilising them for appropriate interventions given the complexity of interactions at the district and building levels.

Furthermore, based on the individual stakeholder's importance rating, using the approach in Menassa & Baer, (2013), is assigned to stakeholders' interests in HOQ. The relationship matrix is prepared for the input data requirements and stakeholder interests. The technical assessment is done by calculation of absolute importance and relative importance (absolute weight and relative weight) to establish the targets (Shrivastava, 2016).

Table 1: Example of a stakeholder-requirements table for building and urban level retrofits.

Urban Planners	Architects	Equipment manufactures	Energy Service Companies	Policy makers
Thermal Energy Demand	Building Information Summary	Energy Demand and delivered energy	Energy Market Prices	Life-cycle Costs
District Heating Network Layout	Construction Data Summary	Building Construction Summary	Energy demands	Annual Emissions
Carbon emissions	Weather Analysis	Load Profiles	Imbalances Markets and Reserves	Renewable Potential
Building typology and block layout	Conditioned and Unconditioned Area of the Building	Weather Analysis	Building typology and block layout	Disaster Management analysis
Building Cluster	Annual Emissions	Life-cycle costs	Renewable Potential	Network Layout
Utility Network layout	Comfort Indicators	System Sizing	Utility Network Layout	Thermal Energy Demand
Weather Analysis	Indoor Air Quality	Renewable Potential	District Primary Energy	
Planning Costs	System Sizing	Occupancy Profiles	Delivered Energy	
Conditioned and Unconditioned Area of the Building	Life-cycle costs	Utility Network Layout		
Renewable potential		Domestic hot water demand		

In order to formulate different requirements for implementing the HOQ approach, it is quite important to identify some of the key stakeholders and their interests for district and building level retrofits. The key stakeholders for energy retrofits as identified by Liang, et al. (2015) do range from an individual person such as Owner/Client to a large institutional body such as banks. Whilst, for the presented approach in this paper, a small example list of different stakeholders and their interests have been identified in Table 1. An example is illustrated with assumptions in the next section elaborating on the use of methodology.

THEORETICAL DEPLOYMENT

The process begins by listing the stakeholder interests and input data categories based on building or district simulation. Examples of HOQ assuming a particular stakeholder for district and building retrofits are given in Figure 5 and Figure 6. The following main steps that were followed in the application of QFD for simple HOQ are:

1. Listing the decision-maker requirements (stakeholders) based on related research and studies
2. Listing the input data requirements for model development based on multiple simulation platforms
3. Development of relationship matrix and depicting strength of relationship (where, blank=no relationship, 1=weak relationship, 5=moderate relationship and 9=strong relationship)
4. Assignment of importance rating to the decision-maker requirements (0=null, 1=low to 9=high)
5. Calculation of absolute and relative importance

The motivation and the perceived benefits for the stakeholders does include social, environmental, economic and technical aspects (Menassa & Baer, 2013), but at building and district level energy simulations apparently, they do not include the social aspects. In Figure 5, the example stakeholder ranks the interests in order of their priority such as thermal energy demand and CO₂ emissions has the highest importance and VOCs have null importance.

Considering the different level of development or detail (LOD) for GIS standards, BIM and BEMS, a detailed ramification of the decisive data is carried out for substantial retrofitting influences. With different LODs at district and building level, the data categories can be combined to inform the users about their use in modelling based on the decision-maker to achieve the required accuracy. An approach introduced by (Quan et al., 2015) aims to understand the influence and the role of urban data in energy analysis substantiates the identification of the model development input data and the assignment of importance rating in the HOQ matrices. A case study of the Civil Engineering

Building, at University College Cork, demonstrated in (Murray, et al., 2014), highlights upon a multi-variable optimisation technique for building retrofits. Using this study, some of the important parameters that were used for developing the set of equations for optimisation, are now characterised for the development of the HOQ matrices in this paper. Consequently, input data, highlighting over the technical, economic and environmental aspects, in building performance simulation is broadly classified into 6 categories in Figure 5 (i) program, (ii) material, (iii) district energy, (iv) equipment, (v) cost, and (vi) emissions. Whereas, for building energy simulation the input data is classified in 7 categories (i) program, (ii) material, (iii) HVAC, (iv) equipment, (v) costs, (vi) emissions and (vii) others.

A HOQ is used to establish relationships and integrate the data categories with stakeholder interests. The data types and their relationships are worked out in a relationship matrix for the systematic recognition based on the needs and objectives of the user such as performance, cost and quality according to the retrofit interventions. As in Figure 6, for building level retrofit decision making, U-value of the building envelope is an important input data requirement for architects to analyse the energy performance of the building. The relationships between the interests and input data requirements have been identified as examples based on the reasoning how models are developed and have hierarchy with model dependent and independent data inputs. The definition of the input simulation data sources along with the process of data acquisition for formulating the stakeholder requirements has been a homogeneous concoction of multiple approaches and related research.

A characterisation of the important input data for district energy performance simulations, as presented in (Wate & Coors, 2015), has been used for the calculation of absolute (as a whole number) and relative importance (in percentage) based on the relationship matrices of the decision maker interests. One such example from Figure 5 could be the higher importance of the building co-ordinates and district heating network layout for urban planners in context to the energy simulations for retrofit decision making. In Figure 6, a higher importance to occupancy, U-value of envelope, ventilation, set points and heating and cooling energy source could be attributed for detailed and quality data acquisition for developing the simulation model as per the stakeholder interests. The calculations of these above-mentioned important examples help in setting up the targets of data acquisition and more focused use of available data in simulations with higher efficiency. Moreover, by identifying specific stakeholders and their interests for practical implementations, the authors are motivated to put into practice the introduced approach in real-time algorithms using the sensitivity analysis (Menberg, et al., 2016; Wang & Augenbroe, 2017) to build the relationship matrices.

The implementation of the QFD House of Quality approach largely depends upon the identification of the stakeholders and their requirements with respect to the analysis domain. In the scope of the presented approach, the identified interests were considered broadly over the stakeholders for building level and district level energy simulations and can be developed suiting the application in simulation model development. Although, the scope of QFD approach is quite large, certain limitations do exist in its implementation. Each relationship matrix created to assess the depth of retrofits required has its specific validity boundaries. Though, depending over the stakeholder's interests, the formulation of the relationships also changes significantly with climatic conditions, district and urban context (Palme & Salvati, 2018) and the building typologies. With an inclined importance over the stakeholders, a proper communication of the requirements and interests is also one of the crucial aspects. Assigning the relationship importance ratings for the presented approach do need a proper communication channel in building and district level energy retrofit analysis. Likewise, simulation scientists and energy analysts can adhere to the QFD approach at a much larger scale by constraining to their respective stakeholders.

CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

An extensive range of simulation tools are available for the technical teams to develop models using a detailed range of input data. It often results in high costs and more time, but their development based on the requirements of the stakeholders could significantly affect district or building retrofit decision-making. In this paper, an approach to quantify the important input data for building and district level energy simulations for retrofit decision-making based on the interests of different stakeholders have been presented. With the implemented HOQ, input simulation data for energy analysis with higher importance scale such as geographical location for district level and ventilation schedules for building level retrofits can be identified. With QFD ranging over a large domain of applications, an HOQ for multiple stakeholders depending on their interests and requirements for energy retrofits could be implemented and modified to suit the needs of the retrofit industry. This study provides a basis of including QFD to accelerate the process retrofit decision-making as it considers bridging the gap between the stakeholders and technical teams.

In the presented paper, example building and district level stakeholders were considered on a coarse level. Further investigations and implementations, by segregating the stakeholders in a much more detailed way depending upon their specific requirements, will be an important step towards optimised decision making for energy retrofits. In future, the authors would like to examine the importance ratings of stakeholder interests and robust interpretation of the input data relationships based on surveys and other means of simulation-based techniques.

REFERENCES

- Agugiario, G., Benner, J., Cipriano, P., & Nouvel, R. (2018, March 5). The Energy Application Domain Extension for CityGML: enhancing interoperability for urban energy simulations. *Open Geospatial Data, Software and Standards*.
- Akao, Y. (1997). QFD: Past, Present, and Future. *International Symposium on QFD*. Linköping.
- ASHRAE. (2018). Energy Simulation Aided Design for Building Except Low-Rise Residential Buildings. *The American National Standards Institute: ANSI/ASHRAE Standard 209-2018*.
- Bazjanac, V., & Kiviniemi, A. (2007). Reduction, Simplification, Translation and Interpretation in the exchange of model data. In *Faculty of CivilEngineering* (pp. 163-168). University of Maribor.
- Berard, O. B., & Karlshøj, J. (2011). Information delivery manuals to integrate building product information into design. *CIB W78-W102 2011: International Conference*.
- Bolstad, P. (2005). GIS Fundamentals: A first text on Geographic Information Systems, Second Edition. *White Bear Lake, MN: Eider Press*.
- BPIE. (2018). Bridging the Gap between Modelling and New Policy Expectations. *Building Performance Institute Europe*.
- Chen, Y., Hong, T., & Piette, M. A. (2017). City-Scale Building Retrofit Analysis: A Case Study using CityBES. *Building Simulation 2017*. USA.
- Ereeş, S., Kuruoğlu, E., & Morali, N. (2013). An Application of Analytical Hierarchy Process for Simulation Software Selection in Education Area. *Frontiers in Science, Vol. 3 No. 2*, pp. 66-70.
- German Environment Agency (2020). Indicator: Energy consumption. Dessau-Roßlau.
- Gooding, L., & Mehreen, S. (2016, June 14). Energy efficiency retrofitting services supply chains: A review of evolving demands from housing policy. *Energy Strategy Reviews*, pp. 29-40.
- Gröger, G., Kolbe, T. H., Nagel, C., & Häfele, K.-H. (2012). OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard. Open Geospatial Consortium.
- Kuntz, K., Sainfort, F., Butler, M., Kulasingam, S., Gregory, S., Mann, E., Kane, R. L. (2013). Decision and Simulation Modeling in Systematic Reviews. *Minneapolis: Agency for Healthcare Research and Quality*.
- Li, B. (2017). Use of Building Energy Simulation Software in Early-Stage of Design Process. Stockholm, Sweden: KTH Royal Institute of Technology.
- Li, W., Zhou, Y., Cetin, K., Eom, J., Wang, Y., Chen, G., & Zhang, X. (2017, December 15).

- Modeling urban building energy use: A review of modeling approaches and procedures. *Elsevier*, pp. 2445-2457.
- Liang, X., Shen, G. Q., & Guo, L. (2015, October 28). Improving Management of Green Retrofits from a Stakeholder Perspective: A Case Study in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, pp. 13823-13842.
- Lilis, G., Giannakis, G., Katsigarakis, K., & Rovas, D. (2018). District-aware Building Energy Performance simulation model generation from GIS and BIM data. *4th Building Simulation and Optimization Conference* (pp. 177-184). Cambridge: IBPSA England.
- Lucha, C., Prah, A., Kampman, B., Cherif, S., Rothballer, C., & Storch, A. (2016). *Local and Regional State of Play and Policy Recommendations Concerning Sustainable Heating and Cooling: Focusing on EU Level Policy*. European Union: Committee of the Regions.
- Macdonald, I., Clarke, J., & Strachan, P. (1999). Assessing uncertainty in building simulation. *Building Simulation*. IBPSA.
- Menassa, C. C., & Baer, B. (2013, October 6). A framework to assess the role of stakeholders in sustainable building retrofit decisions. *Sustainable Cities and Society*, pp. 207-221.
- Menberg, K., Heo, Y., & Choudhary, R. (2016, December 1). Sensitivity analysis methods for building energy models: Comparing computational costs and extractable information. *Energy and Buildings*, pp. 433-445.
- Murray, S. N., Walsh, B. P., Kelliher, D., & O'Sullivan, D. (2014, January 17). Multi-variable optimization of thermal energy efficiency retrofitting of buildings using static modelling and genetic algorithms - A case study. *Building and Environment*, pp. 98-107.
- Palme, M., & Salvati, A. (2018, September 11-12). UWG - TRNSYS Simulation Coupling for Urban Building Energy Modelling. *IBPSA England*, pp. 635-641.
- Paul, D., Mandal, S., Mukherjee, D., & Chaudhuri, S. B. (2010, March 26). Optimization of significant insolation distribution parameters - A new approach towards BIPV system design. *Renewable Energy*, pp. 2182-2191.
- Pheng, L. S., & Yeap, L. (2001, June). Quality Function Deployment in Design/Build Projects. *Journal of Architectural Engineering*, pp. 30-39.
- Pinheiro, S., Wimmer, R., O'Donnell, J., Muhic, S., Bazjanac, V., Maile, T., van Treeck, C. (2018, February 22). MVD based information exchange between BIM and building energy performance simulation. *Automation in Construction*, pp. 91-103.
- QFD Institute. (2011). Retrieved from: The official source for QFD: http://www.qfdi.org/books/symposium_%20proceedings_2011-present.html
- Quan, S. J., Li, Q., Augenbroe, G., Brown, J., & Yang, P. P.-J. (2015). Urban Data and Building Energy Modeling: A GIS-Based Urban Building Energy Modeling System Using the Urban-EPC Engine. In *Planning Support Systems and Smart Cities* (pp. 447-469). Switzerland: Springer International Publishing.
- Reeves, T., Olbina, S., & Issa, R. (2015, June 23). Guidelines for Using Building Information Modeling for Energy Analysis for Buildings. *Buildings*, pp. 1361-1388.
- Reinhart, C. F., Dogan, T., Jakubiec, J. A., Rakha, T., & Sang, A. (2013). UMI - AN URBAN SIMULATION ENVIRONMENT FOR BUILDING ENERGY USE, DAYLIGHTING AND WALKABILITY. *Building Simulation*. Chambéry, France.
- Reinhart, J., Bedrick, J., & al., e. (2013). *Level of Development Specification For Building Information Models*. BIMFORUM.
- Robinson, D., Haldi, F., Kämpf, J., Leroux, P., Perez, D., Rasheed, A., & Wilke, U. (2009). CitySIM: Comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning. *Eleventh International IBPSA Conference*. Glasgow, Scotland.
- Sebi, C., Nadel, S., Schlomann, B., und Steinbach, J. (2018). Policy strategies for achieving large long-term savings from retrofitting existing buildings. *Energy Efficiency* 12, 89–105.
- Senave, M., & Boeykens, S. (2015). Link between BIM and energy simulation. Retrieved January 14, 2019, from www.witpress.com, ISSN 1743-3509 (on-line)
- Shrivastava, P. (2016, September 9). House of Quality: An Effective Approach to Achieve Customer Satisfaction & Business Growth in Industries. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, pp. 1365-1371.
- van Treeck, C., Elixmann, R., Rudat, K., Hiller, S., Herkal, S., & Berger, M. (2016). *Gebäude. Technik. Digital*. Springer Vieweg.
- Wang, Q., & Augenbroe, G. (2017, August 7-9). Combined Sensitivity Ranking of Input Parameter and Model Forms of Building Energy Simulations. *Building Simulations, IBPSA*, pp. 2042-2049.
- Wate, P., & Coors, V. (2015). 3D Data Models for Urban Energy Simulations. *6th International Building Physics Conference, IBPC*.

COMPARISON OF DIFFERENT ENERGY DEMAND CALCULATION MODELS ON URBAN SCALE

H. Harter¹, F. Banihashemi¹, D. Kierdorf¹, M. Vollmer¹ and W. Lang¹

¹Institute of Energy Efficient and Sustainable Design and Building, TU Munich, Munich, Germany

ABSTRACT

Performing building life cycle assessment at city quarter level is a necessary step towards developing and implementing strategies for sustainable urban development. This paper compares energy demand calculation results of two established building simulation tools and a calculation according to the German Energy Saving Ordinance with those of an own developed tool. This tool is called *urbi+* and calculates the life cycle based energy demand of residential buildings at city quarter level. It is shown that the simplified method for energy demand calculation of the building's use stage delivers resilient results on building as well as on city quarter level.

INTRODUCTION

Introduction of the Overall Topic

One of the main challenges of the upcoming decades will be the creation of a climate-neutral building stock until 2050 (European Commission 2018). Technical facilities are already available and must be placed into a reasonable context (Jarek Kurnitski 2013). The aim is to reduce the energy demand of the existing building stock by increasing the energetic demands on the building envelope and the efficiency of technical building services by integrating renewable energy technologies (Chwieduk 2003).

Nowadays the simulation-based energetic analysis of buildings already takes an essential role in the planning of energy-efficient and sustainable buildings (Shoubi et al. 2015; Sousa 2012). Building simulations can therefore be used to show up a way on how to realize climate-neutral buildings, which can be reflected from already existing studies (Marszal et al. 2011; Nguyen, Reiter, and Rigo 2014).

However, these studies usually refer only to individual buildings or building complexes and to the energy demand of the use stage of the building (Ramesh, Prakash, and Shukla 2010; Reinhart and Cerezo Davila 2016). Nevertheless, in order to develop recommendations for action that point the way to a climate-neutral building stock, it is necessary to develop and carry out life cycle based energy and emission related analyses, evaluations and assessments of large building stocks. Although individual building-related pilot projects can demonstrate the concrete feasibility of climate-neutral

buildings, the application and impact of the measures used to accomplish climate-neutral buildings must be calculated and evaluated on a large scale. But simulations on building and larger level(s) are mostly very time-intensive and error-prone (Remmen et al. 2018). The challenges of an assessment approach on urban scale are caused by different variables. For example, the heterogeneous building structure, where buildings of different building age classes can be present, or the data availability and quality (Peyramale and Wetzel 2017).

Therefore, the approach is to develop a tool (*urbi+*) that can provide a quick, automatized and reliable calculation of the building's life cycle energy demand, to enable *urban improvement* concerning sustainable development. Since the energy demand of the current building stocks use stage accounts for the largest share of energy demand along the whole life cycle of buildings (Assiego De Larriva et al. 2014), we are first focusing on developing a method for an reliable and quick calculation of the energy demand of the buildings use stage and to transfer it on a district, city or regional level.

Introduction of our Approach

We are using 3D city models, based on the open data model *CityGML* (Kolbe 2009), as one input-source for *urbi+* and as data exchange facility. A 3D city models contains different objects, in our case buildings, with specific information describing these buildings. This allows us to use and facilitate the exchange of information of large building stocks for the calculations. *Urbi+* additionally asks for a few input-parameters (see *Simulation* section) via a GUI. Having all the information together, calculating the energy demand for heating and domestic hot water (DHW) on the level of specific buildings and whole city quarters (depending on the number of building objects stored in the 3D city model and the specific selection of these) is the next step.

In this study, the methodical procedure for a fast and efficient calculation of the energy demand for heating and DHW at building and city quarter level is discussed. The results on specific building level will be compared with common and verified procedures of well-established building and urban simulation tools.

Additionally, first extrapolations are carried out at the district level.

After the *Introduction* section a condensed summary of the *State of the Art* is presented in which a selection of well-known studies in this field are briefly described. Followed by this, the methodological approach of the study is presented in the *Methodology* section. This section provides a short description of the approaches and tools used in the scope of the study. Additionally, an overview of the methodological approach of *urbi+* and the considered case study are presented in this section. The *Methodology* section is followed by the *Simulation* section where the boundary conditions of the conducted simulations are presented. The following *Results* section summarizes the calculation results and provides conclusions with regard to the calculated values. The *Conclusion* and *Future Work* sections summarize the overall findings of the study and provide an outlook on what is coming next, regarding the further development of *urbi+*.

STATE OF THE ART

Large properties have a high potential for energy saving. However, the heterogeneous building stock, data availability and quality, etc. is a great challenge (Peyramale and Wetzel 2017). There are already models and tools available and there is also research in this field running, which allows the evaluation of existing buildings in regard to their energetic performance as well as considering possible refurbishment concepts, according to the state of the art.

Within the *HoEff-CIM* project, which was carried out at the Technical University of Munich, a tool was developed that provides an easy and cost-effective data collection of existing buildings. The so-called *QuickCheckTool* determines the energy demand based on the building age class and the actual condition of the building and proposes renovation concepts for the property. Based on an university campus, an energy master plan was developed which identifies the most energy-intensive buildings and provides recommendations for energy-saving measures. The refurbishment measures are evaluated with regard to energy, economic and ecological aspects. However, this tool only considers individual properties and a great deal of effort must be put into data collection and processing. (Dotzler et al. 2018)

An already existing tool which operates on 3D city models (CityGML) is *SimStadt*. *SimStadt* got developed at the *Centre for Renewable Energy Technology (zafh.net)* at the *University of Applied Sciences Stuttgart*. *SimStadt* is an urban energy simulations platform to calculate energy transition at urban scale. Within the first version, a solar and PV potential analysis as well as the calculation of the energy demand of buildings can be carried out. In

addition, CO₂-emissions can be displayed and simulations of refurbishment measures can be performed (Nouvel et al. 2015).

City Building Energy Saver (CityBES) is a project located at the *Lawrence Berkeley National Laboratory*. It also uses the open data standard CityGML to support efficiency programs at district or city-scale. The web-based tool allows quick energy modeling and analysis of large building stocks. Energetic simulations are executed on an EnergyPlus calculation kernel. Furthermore, the PV potential is estimated and analyses for building refurbishment are proposed to support retrofit decisions (Chen, Hong, and Piette 2017).

Urban modelling interface (*umi*) is a Rhinoceros-based urban modeling design tool for observing and simulating entire neighborhoods. It consists of an integrated operational energy module based on EnergyPlus, a daylighting module based on Radiance/Daysim, an embodied energy and carbon calculation module and a walkability analysis of neighborhoods. The three-dimensional visualization of the city quarter allows a quick identification of the most energy-intensive buildings by colored marking (Reinhart et al. 2013).

The state of the art shows that there are already several models and tools existing, which allow to determine and visualize the energy demand at building and district level. In general, these models and tools are, however, focusing mainly on simulating the energy demand of a building's, or of all buildings in city quarter's use stage as accurate as possible. But comprehensive approaches of assessing the life cycle based energy demand of the structural building elements and technical services is missing. It should also be mentioned here that building simulation is still facing the problem of integrating proper user behavior models. That is one of the reasons why there is very often a large energy performance gap between the simulated energy demand during the design phase of buildings and the measured energy consumption during building use (Moeller et al. 2020).

Urbi+ is therefore focusing more on assessing the life cycle based energy demand of buildings, then on specifically calculating the energy demand of the building's use stage. However, since the use stage of the already existing buildings accounts for the largest relative share in total energy demand and environmental impact, considering all life cycle phases, *urbi+* first focuses on the specific assessment of the buildings use stage. Therefore, the following chapter describes a methodology to quickly calculate resilient and usable energy demand calculation results on building and city quarter level.

METHODOLOGY

Methodical Approach of the Study

Within the study, four approaches/tools to determine the buildings energy demand are considered on the basis of a real existing reference building, which is used as a case study. The calculation results of *urbi+* are compared with the two different already established building simulation tools as well as a calculation according to the *Germany Energy Saving Ordinance (EnEV)* to prove that the simplified method, which is implemented in *urbi+*, delivers usable and reliable results.

Established building simulation tools:

1) *IDA Indoor Climate and Energy (ICE)*: *IDA ICE* is a building simulation tool developed by *EQUA Simulation AB*. *IDA ICE* allows a very accurate and precise dynamic simulations on the level of single buildings and building blocks. (EQUA Solutions AG n.d.)

2) *umi* (also see *State of the Art* section): The tool is used to evaluate, amongst others, the environmental performance, regarding the operational and embodied energy use, on urban scale.

3) Calculation according to EnEV and BEC: The *BEC* is based on the *German Energy Saving Ordinance (EnEV)*, and refers to the DIN-norms *DIN V 4108-6* (Thermal protection and energy economy in buildings – Part 6: Calculation of annual heat and energy use) (DIN V 4108-6:2003-06 2003) and *DIN V 4701-10* (Energy efficiency of heating and ventilation systems in buildings – Part 10: heating, domestic hot water supply, ventilation) (DIN V 4701-10:2003-08 2003) for the energy demand calculation. The BEC is an official and verified document that provides information on the energy performance of buildings in Germany.

4) *urbi+*: At the *Institute of Energy Efficient and Sustainable Design and Building of the Technical University of Munich*, *urbi+* is developed for calculating the life cycle based energy and emission related performance (embodied/grey and operational

energy and emissions) of large building stocks (based on *Java* programming language). More information to *urbi+* is provided in the following subsection *Methodological Approach of urbi+*.

To verify the results of *urbi+*, its calculation results are compared with the results of *IDA ICE*, *umi* and *BEC*. All results are based on one specific building, which is used as case study in a first step. The building is assessed in a refurbished and non-refurbished status. In total this leads to six calculation processes, which are compared with each other. In a following step the whole city quarter, in which the specific building is located, is assessed by using *urbi+*.

Methodical Approach of urbi+

The methodological approach of *urbi+* allows a quick and sufficiently accurate approach to determine the building's energy demand of the use stage, based on 3D city models (see Fig. 1). This process works iterative for all residential buildings in the 3D city model, which are chosen to be considered in the assessment. The summary of the results of all residential buildings under consideration provides the energy balance of the building stock to be assessed.

Assumptions

Before explaining the different methodological steps, its underlying assumptions are explained in a first step:

- 1) The calculation of the energy demand of the building's use stage is based on a single zone model.
- 2) There is no floor plan or specific zoning used for the calculation since this information is generally not available in 3D city models on large scale
- 3) Since also the information on the refurbished standard of buildings is not available, we assume that the condition of the constructional elements and the energetic standard of the building (e.g. u-values) refers to its year of construction.
- 4) All calculations refer to the regulations of the *German Energy Saving Ordinance* and therefore to *DIN V 4108-6* and *DIN V 4701-10*. The *heating period*

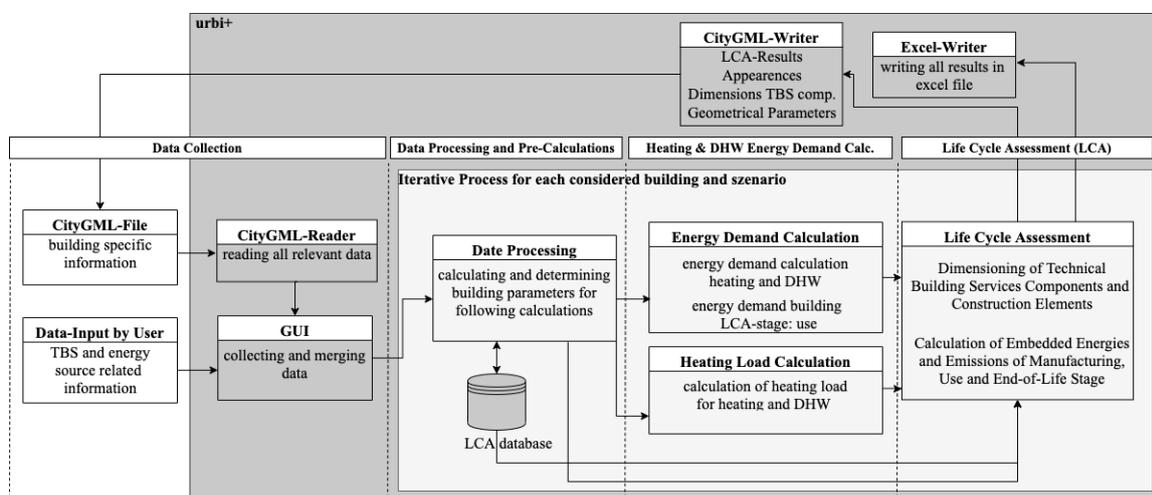


Figure 1: Overview Methodological Approach *urbi+*

procedure is chosen as an approach within the norms. The length of this period is set to 185 days.

5) The used building model is available in level of detail 2 (LOD). This means, that the cubature of the building, including the roof shape, is available, but no windows or internal walls, etc.

6) The focus is set on residential buildings, since these account for 22% of the global final energy consumption (UN Environment and the International Energy Agency 2017).

Step1: Data collection

The methodological procedure for calculating the building's energy demand starts with data collection. Building data for each considered building is specifically sourced from the 3D city model. The following information, mandatory for the calculation, must be available from each considered building in the 3D city model:

- Building geometry of wall, roof and ground surfaces, described by polygons.
- The building function or usage (e.g. residential, public, office building)
- The buildings year of construction
- The building's roof type
- Number of storeys above and below ground

Since building specific information concerning the building usage and the energy system are in general not available in 3D city models, this information must be provided for the calculation via the graphical user interface (GUI) of *urbi+*. The following necessary information has to be defined:

- Definition of thermal zone of the building (heated top floors and basements)
- Location of the building (for definition of average external temperature)
- Energy systems for heating and domestic hot water

Step 2: Data processing and first pre-calculations

With the information about the function or usage of the building, the residential buildings, which are to be considered, can be selected. In the next step the area of all building parts (walls, roof, ground) is calculated by using the provided polygons. With the definition of the thermal zones, the roof type and the general measures of the building, the building's net volume can be calculated. The living area is calculated by multiplying the number of heated storeys with the ground floor area and the factor of 0.89 (see Eq. 1) (Bogenstätter 2007).

$$A_L = A_g * n_s * 0.89 \quad (1)$$

A_L = living area [m²]; A_g = ground floor area [m²]; n_s = number of storeys [-].

Using the *SharedWallSurface* calculation tool, developed by Sindram for Kaden (Kaden 2014), the area of all walls that are 'shared' between building, e.g. for row houses, are calculated.

With the building's year of construction, the building can be sorted into a specific *building age class*. According to the *German building typologies*, worked out in the TABULA project (Loga et al. 2015), specific u-values and g-values are defined for all considered building parts of each building age classes. In addition to that, *urbi+* allows an own definition of u-values and g-values for each building age class via the GUI, if required. The method of calculating window areas is based on an age-class related estimation of window areas in relation to the square meters of living space of a building, according to Heinrich (Heinrich 2018), based on Diefenbach et al. (Diefenbach et al. 2010) and Loga et al. (Loga et al. 2005), the window area is distributed evenly over all external walls that are not shared between buildings.

Step 3: Calculation of heating and DHW energy demand

The energy demand calculation for heating and DHW is conducted according to the simplified *heating period procedure* defined in the already mentioned norms *DIN V 4108-6* and *DIN V 4701-10*. The following main parameters are considered for calculating the energy demand for heating in a first step (see Eq. 2):

$$Q_h = Q_l - \eta_P (Q_s + Q_i) \quad (2)$$

Q_h = useful energy demand [kWh]; Q_l = heat losses (transmission + infiltration) [kWh]; Q_s = solar gains [kWh]; Q_i = internal gains [kWh]; η_P = utilization factor [-].

For calculating the *heat losses from transmission*, the defined u-values and calculated areas of all building components, according to the defined thermal zone of the building, are used. For the calculation of the *heat losses from infiltration* the calculated building volume is used as basis and multiplied with a constant factor, defined in *DIN V 4108-6*. The *solar gains* are calculated by using the calculated window area, their distribution over all non-shared walls and generic radiation values for Germany, defined in *DIN V 4108-6*. The *internal gains* are calculated by multiplying the calculated building volume with a generic factor, also defined in *DIN V 4108-6*.

The sum of *solar and internal gains* is multiplied with a *utilization factor* and then subtracted from the sum of *transmission and infiltration losses*, which results in the building's *useful energy demand*. The *utilization factor* thereby varies according to the average external temperature).

Additionally, the heat losses during and auxiliary energies for the transfer of heat into the room and for heat storage and distribution are added to the *useful energy demand*. The resulting sum is then multiplied

with the product of the *heat generator expenditure figure* and the *cover ratio for heating*, both defined in *DIN V 4701-10*. This finally results in the building's *final energy demand*.

When calculating the energy requirement for DHW, a fixed value of 12.5 kWh/m²a is initially assumed as the useful energy requirement, according to *DIN V 4701-10*. Analogous to the heating energy demand calculation the heat losses during and auxiliary energies for the transfer of heat into the room and for heat storage and distribution are added to the final energy demand of 12.5 kWh/m²a. The resulting sum is also multiplied with the product of the *heat generator expenditure figure* and the *cover ratio for DHW*, which then results in the final energy demand for DHW.

Single and multi-building calculation

The model distinguishes between the calculation on the level of specific buildings and the calculation of the entire building stock. If individual buildings are selected for the assessment, the energy system can be defined for each building specifically (if information is available). If, however, an entire building stock is to be assessed, the distribution of energy systems over the entire building stock is used for energy demand calculations on individual building level. This means that if 80% of the buildings in a building stock are supplied with heat by a gas boiler and 20% by an oil boiler, then this percentage distribution is assumed for the heating energy demand calculation of each building in the assessed building stock. Each building is therefore supplied with heat by 80% gas and 20% oil boilers. This is due to the fact that the calculation of the energy demand of a whole building stock consists of the sum of all energy demand calculations of all considered buildings, in an iterative process, according to the method described above. However, as there is no building-specific information on the energy system on building stock level, the percentage of energy systems across the entire building stock is used for the iterative calculation process at the level of individual buildings. It is assumed that the resulting error is less than if a gas boiler is arbitrarily assumed for 80% of the buildings and an oil boiler for 20% of the buildings. For a specific, logical allocation of specific energy systems to specific buildings, the necessary data sets are missing. Due to the different building sizes, the resulting areas of the building components and the volumes, large deviations and possibly errors can occur when allocations are carried out arbitrarily.

SIMULATION

The following simulations are once carried out for one specific building, in all four described approaches/tools, and once for the whole city quarter, where the specific building is located in, by using *urbi+*. On the basis of the calculation of the entire city quarter, the transformation of the calculation method to large building stock is demonstrated.

Description of Specific Building

The object of investigation is an existing residential building in the city of Munich (see schematic illustration in Fig. 2) consisting of 72 residential units. The building was constructed between 1959 and 1960. The building and system technology were renewed in 1980. The heat generator was replaced in 2016. The main energy sources for heating and DHW are electricity and gas. The building has a usable area of 4,316m². There are BEC's from before (2009) and after (2017) a refurbishment took place available and used for the comparison.

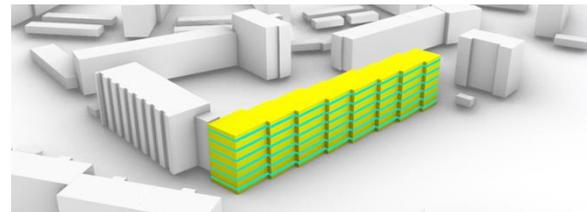


Figure 2: Graphical representation of specific building color marked in umi, Rhinoceros 3D

Description of Whole City Quarter

380 buildings are existing in the considered city quarter located in the city of Munich (see Fig. 3). 213 of these buildings are residential buildings. Around 70% of these buildings are built in the 1960's. The average living area is 664m² and the average net building volume 2,265m³.



Figure 3: Graphical representation of city quarter

Definition of Simulation Input-Data

Specific Building: The following listing shows the essential boundary conditions that were assumed for the simulation of the non-refurbished status of the building. These are based on the data sourced from the CityGML model and provided via the GUI (according to information on *BEC* and of on-site inspections). These definitions serve as input parameters for the simulation/calculation of the energy demand for heating and DHW in the four different approaches/tools:

- all levels are heated
- heating: 100 % gas
- DHW: 80% gas, 20% electric flow heaters
- heat transfer system: 100% radiators
- u-values of the building envelope:
 - external wall: 0.4 W/(m²*K)
 - base plate: 1.0 W/(m²*K)

- roof: 0.3 W/(m²*K)
- windows: 1.8 W/(m²*K)
- g-value window: 0.78
- average temperature (heating period): 7.9 °C
- minimum annual temperature: -16 °C

The following parameters are defined for the calculating a refurbished status of the specific building:

- all levels are heated
- heating: 100 % air-water heat pump
- DHW: 100 % air-water heat pump
- heat transfer system: 100% floor heating
- u-values of the building envelope:
 - external wall: 0.16 W/(m²*K)
 - base plate: 0.3 W/(m²*K)
 - roof: 0.15 W/(m²*K)
 - windows: 1.2 W/(m²*K)
- g-value window: 0.5
- average temperature (heating period): 7.9 °C
- minimum annual temperature: -16 °C

City Quarter: The calculation of the entire urban district is carried out in two runs. In the first run the definitions, applicable to the non-refurbished individual building, are used for the calculation city quarter level. However, it must be taken into account that the u-values and also the g-value automatically adapt and change depending on the age class into which the respective building is divided (see *Step 2* in subchapter *Methodical Approach of urbi+*). In the second run, the following definitions of energy supply systems, which are more realistic for the urban district, is adopted. All other parameters, except the u- and g-values, are remaining the same:

- heating: 30% gas, 10% oil, 10% heat pumps with geothermal probe, 10% electric heaters, 40% district heating
- DHW: 20% gas, 10% oil, 10% gas storage heaters, 20% electric flow heater, 20% solar systems, 20% district heating
- heat transfer system: 50% radiators, 50% floor heating

RESULTS

The final energy demand calculation results are presented for the non-refurbished and refurbished condition of the building. Additionally, two calculations are conducted on city quarter level, both with different definitions of input-parameters. Furthermore, the effect on the specific building calculation of changing parameters on city quarter level is shown.

Specific Building: The results for the non-refurbished status of the building show that *urbi+* calculates the highest (101.3 kWh/m²a) and the *BEC*, with 24% less, the lowest (77.4 kWh/m²a) energy demand (see Fig. 4). The simulation results of *IDA ICE* and *umi* both result in 92.3 kWh/m²a. This is 8.9% lower than the result of the developed model and 19.3% more than the calculated value of the *BEC*. Comparing the results

of the non-refurbished status of the building it can be seen that the *BEC* presents the highest energy demand (16.3 kWh/m²a) and *IDA ICE* simulates, with 26% less, the lowest (12.0 kWh/m²a) energy demand. The result of *umi* (12.1 kWh/m²a) is almost the same as the *IDA ICE* result. *Urbi+* calculates a result in between, with 12.9 kWh/m²a. This is 7.5% more than the *IDA ICE* and *umi* results and 21% lower than the value from the *BEC*.

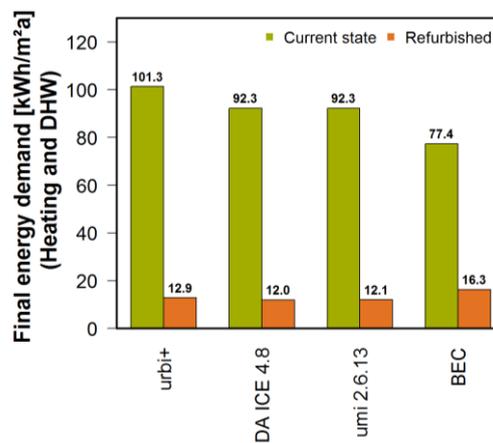


Figure 4: Comparison of final energy demand calculation results of the four different tools

The following reductions are thereby achieved: *urbi+* 87.3%, *IDA ICE* 87.0%, *umi* 86.9% and *BEC* 78.9%. The difference between the result of the developed model and the *BEC* is, however worth discussing, especially because both calculations are mainly based on the same ordinance and DIN-norms. The difference result from the fact that two different calculation approaches were selected within DIN V 4108-6. Firstly, the heating period procedure in *urbi+* and secondly the monthly balance sheet method, which is used for *BEC* according to EnEV. The heating period procedure is thereby a much more simplified and conservative approach. That is why the calculation result of the *BEC* is 24% lower than the one of the developed model. In the case of the refurbishment the changing parameters seem to have a much higher impact on the heating period procedure than on the monthly balance sheet method. one reason for this could be the significantly smaller dimension and complexity of calculation steps in the heating period procedure. This results in more dependencies within the method steps in the monthly balance sheet method and above all on specific parameters that are adapted within the method by changing the input parameters to depict a renovated condition of the building. Overall it can be stated, that *urbi+* calculates, when referring to the specific building, meaningful and reliable results.

The calculation can thus be put to use in the course of extrapolations at city quarter level.

City Quarter: The calculation time of the energy demand calculation (including all steps of the *data processing and first pre-calculations*) of all 213 residential buildings on a conventional laptop,

excluding the definition of the CityGML-file and all specifications in the GUI, was seven seconds (no parallelization in code). The results show (see Tab. 1) that the yearly absolute final energy demand for heating and DHW of all 213 residential buildings account for 29.6GWh, which results in an average specific yearly final energy demand of 220.0kWh/m²a. These values represent reasonable results in view of the building structure of the city quarter. The following change to a more realistic spread of energy system on city quarter level (second calculation) results in a reduction of 13% in the absolute and 12% in the specific final energy demand (see definition of energy systems in *Simulation* chapter and Tab. 1). This is also a logical result and, besides other, mainly due to the fact that in the second calculation more efficient renewable energy technologies are included in the percentage distribution of energy systems across the city quarter.

Table 1:
Calculation results of *urbi+* on city quarter level

	first calculation	second calculation
absolute final energy demand [GWh/a]	29.6	26.1
Ø specific final energy demand [kWh/m ² a]	220.0	194.2

Specific Building vs. City Quarter: In a next step it is interesting to see how this change of the percentage distribution of energy systems across the city quarter (second calculation) affects the energy demand calculation on *specific building* level. The specific final energy demand of the non-refurbished status of the *specific building* is here presented (see Tab. 2).

Table 2:
Calculation results of *urbi+* of refurbished and non-refurbished status of *specific building*

	first calculation	second calculation
Ø specific final energy demand [kWh/m ² a]	101.3	70.5

Looking at the results of Table 2 it can be seen, that a reduction of 30% appears from changing the energy systems from the first to the second calculation. The effect is even significantly higher than with the calculation at *city quarter* level.

This leads to the conclusion, which has not been further examined, that when assessing a whole city quarter, the energy demand calculation on *specific building* level should not necessarily be consider for further examinations. But that the overall result of the final energy demand at city quarter level represents a reliable and sufficiently accurate value for further studies and calculations.

CONCLUSION

This study has shown that our developed model provides reliable results on specific building and city quarter level and can be used as a basis for further studies. However, there must be a clear distinction between the assessment at a specific building level and the city quarter level. Otherwise, this can lead to misinterpretations of the results. With the validation of the calculation result of the use stage of the building, the first step towards a simulation tool (*urbi+*) to calculate the life cycle based energy and emission related performance of buildings is set.

FUTURE WORK

In the future, the developed procedure is to be supplemented by the aspects of Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Costing (LCC) both for the building construction and for the building services. The present state of work provides an excellent basis for this and above all, the already useful results for the final energy demand calculation of the use stage of the buildings under consideration (specific buildings and whole city quarters). In Addition, uncertainty and sensitivity analysis has to be carried out to get information about the possible error which could result based on the comparison of all different possible ways of input parameter definitions. This could also lead to optimization procedures, that provide an optimal usage of renewable energies. Also comparing calculation results on city quarter level with monitoring data, including building specific information to the energy system, would be helpful to evaluate the calculation results on specific buildings as well as the city quarter level. Additionally, the energy performance gap could be further assessed in the scope of such a study. In the meanwhile, *urbi+* is tested on a building stock of more than 115,000 residential buildings.

ACKNOWLEDGEMENT

The presented study is partly based on research conducted in the project *Green City of the Future* (grand code: 01LR1727A), funded by the *German Federal Ministry of Education and Research (BMBF)*. Special thanks go to B. Willenborg (Chair of Geoinformatics - Technical University of Munich) for his support in developing and programming *urbi+* and to his colleague M. Sindram for providing the *SharedWallSurface* calculator.

REFERENCES

- Assiego De Larriva, Rafael, Gloria Calleja Rodríguez, José Manuel Cejudo López, Marco Raugei, and Pere Fullana I Palmer. 2014. "A Decision-Making LCA for Energy Refurbishment of Buildings: Conditions of Comfort." *Energy and Buildings* 70:333–42.
- Bogenstätter, Ulrich. 2007. "Flächen- Und Raumkennzahlen." 1–10.

- Chen, Yixing, Tianzhen Hong, and Mary Ann Piette. 2017. "City-Scale Building Retrofit Analysis: A Case Study Using CityBES." *Proceedings of BS2017* (August).
- Chwieduk, Dorota. 2003. "Towards Sustainable-Energy Buildings." *Applied Energy* 76(1–3).
- Diefenbach, Nikolaus, Holger Cischinsky, Markus Rodenfels, and Klaus-Dieter Clausnitzer. 2010. *Datenbasis Gebäudebestand Datenerhebung Zur Energetischen Qualität Und Zu Den Modernisierungstrends Im Deutschen Wohngebäudebestand*.
- DIN V 4108-6:2003-06. 2003. "Thermal Protection and Energy Economy in Buildings – Part 6"
- DIN V 4701-10:2003-08. 2003. "Energy Efficiency of Heating and Ventilation Systems in Buildings – Part 10"
- Dotzler, Christina, Sebastian Botzler, Daniel Kierdorf, and Werner Lang. 2018. "Methods for Optimising Energy Efficiency and Renovation Processes of Complex Public Properties." *Energy and Buildings* 164.
- EQUA Solutions AG. n.d. "IDA ICE - Simulation Software | EQUA." Retrieved April 2, 2020 (<https://www.equa.se/de/ida-ice>).
- European Commission. 2018. *A Clean Planet for All - A European Strategic Long-Term Vision for a Prosperous, Modern, Competitive and Climate Neutral Economy*. Brussels.
- Heinrich, Matthias Arnold. 2018. "Erfassung Und Steuerung von Stoffströmen Im Urbanen Wohnungsbau – Am Beispiel Der Wohnungswirtschaft in München-Freiham."
- Jarek Kurnitski. 2013. *Cost Optimal and Nearly Zero-Energy Buildings Definitions, Calculation Principles and Case Studies*.
- Kaden, Robert. 2014. "Berechnung Der Energiebedarfe von Wohngebäuden Und Modellierung Energiebezogener Kennwerte Auf Der Basis Semantischer 3D-Stadtmodelle."
- Kolbe, Thomas H. 2009. "Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML." Pp. 15–31 in *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Loga, Tobias, Nikolaus Diefenbach, Jens Knissel, and Rolf Born. 2005. *Entwicklung Eines Vereinfachten Statistisch Abgesicherten Verfahrens Zur Erhebung von Gebäudedaten Für Die Erstellung Des Energieprofils von Gebäuden - Kurzverfahren Energieprofil*.
- Loga, Tobias, Britta Stein, Nikolaus Diefenbach, and Rolf Born. 2015. *Deutsche Wohngebäudetypologie - Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden*. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt.
- Marszal, A. J., P. Heiselberg, J. S. Bourrelle, E. Musall, K. Voss, I. Sartori, and A. Napolitano. 2011. "Zero Energy Building - A Review of Definitions and Calculation Methodologies." *Energy and Buildings* 43(4):971–79.
- Moeller, Simon, Ines Weber, Franz Schröder, Amelie Bauer, and Hannes Harter. 2020. "Apartment Related Energy Performance Gap – How to Address Internal Heat Transfers in Multi-Apartment Buildings." *Energy and Buildings*.
- Nguyen, Anh Tuan, Sigrid Reiter, and Philippe Rigo. 2014. "A Review on Simulation-Based Optimization Methods Applied to Building Performance Analysis." *Applied Energy* 113.
- Nouvel, Romain, K. H. Brassel, M. Bruse, E. Duminil, V. Coors, U. Eicker, and D. Robinson. 2015. "SIMSTADT, a New Workflow-Driven Urban Energy Simulation Platform for CityGML City Models." *CISBAT International Conference*.
- Peyramale, Vincent and Christian Wetzel. 2017. "Analyzing the Energy-Saving Potential of Buildings for Sustainable Refurbishment." *Procedia Environmental Sciences* 38:162–68.
- Ramesh, T., Ravi Prakash, and K. K. Shukla. 2010. "Life Cycle Energy Analysis of Buildings: An Overview." *Energy and Buildings* 42(10).
- Reinhart, Christoph, Timur Dogan, Alstan Jakubiec, Tarek Rakha, and Andrew Sang. 2013. "umi- an urban simulation environment for building energy use, daylighting and walkability." *13th IBPSA Conference, Chambéry, France*.
- Reinhart, Christoph F. and Carlos Cerezo Davila. 2016. "Urban Building Energy Modeling - A Review of a Nascent Field." *Building and Environment* 97.
- Remmen, Peter, Moritz Lauster, Michael Mans, Marcus Fuchs, Tanja Osterhage, and Dirk Müller. 2018. "TEASER: An Open Tool for Urban Energy Modelling of Building Stocks." *Journal of Building Performance Simulation* 11(1):.
- Shoubi, Mojtaba Valinejad, Masoud Valinejad Shoubi, Ashutosh Bagchi, and Azin Shakiba Barough. 2015. "Reducing the Operational Energy Demand in Buildings Using Building Information Modeling Tools and Sustainability Approaches." *Ain Shams Engineering Journal* 6(1):41–55.
- Sousa, Joana. 2012. "Energy Simulation Software for Buildings: Review and Comparison." *CEUR Workshop Proceedings* 923:57–68.
- UN Environment and the International Energy Agency. 2017. *Towards a Zero-Emission, Efficient, and Resilient Buildings and Construction Sector*.

CITY ATB: CITYGML ANALYSIS TOOLBOX FOR ENERGY PERFORMANCE SIMULATIONS

A. Malhotra¹, S. Raming¹, J. Frisch¹ and C. van Treeck¹

¹Institute of Energy Efficiency and Sustainable Building (e3D), RWTH Aachen University, Aachen, Germany

ABSTRACT

District level energy simulations often require large datasets to extensively incorporate the semantic and topological information into the simulation environments. Moreover, the extraction and analysis of the desired data model can highly reduce the computational time resulting into higher efficiency. In this paper, an analysis toolbox is introduced which can be used to search, analyse and validate large CityGML datasets for district level energy simulations. Furthermore, the functionality to save the results into multiple industry friendly data formats is also further discussed.

INTRODUCTION

Emerging technologies, computational algorithms and simulation environments enable users, facility managers and occupants to achieve a good estimation of the energy demands of their buildings, districts and cities. This is a huge step forward towards the realization of the 7th United Nations Sustainable Goal of ensuring an affordable, reliable, sustainable and modern energy for the population of our planet (Economic and Social Council 2019). From the planning phases of a building envelop to the refurbishment phase of a fully constructed district, the ease and flexibility of searching, analysing and thereafter validating the appropriate data models for energy simulations is still limited. Although some public and private institutions do facilitate this process of data analysis, it is limited to a very small number of people and industries. Despite the deployment and implementation of a large number of software tools for energy simulations, this functionality to find and input the appropriate data model requires higher consideration. To bridge the gap between the recognition of an individual available building model, its analysis and validation, a framework is developed to enhance the user capabilities for a thorough preliminary investigation. Hence, human and computational efforts as well as costs relating to energy performance simulations at a building and/or urban scale can be highly reduced. Within the framework, an input functionality of City Geographical Markup Language (CityGML) data models for multiple levels of detail (LoD) with or without Energy ADE has been implemented. An

analysis for a large number of buildings and their building parts, along with validation algorithms, conforming to standardized schemas of the data models, from a building level to an urban scale is developed. This is integrated with the flexibility of saving the results in multiple industry friendly data formats. Therefore, by reducing the time and effort for the analysis of complex data models, the framework presented in the paper visions an increase in the adaptability of the CityGML standard between research communities, simulation scientists and urban planners. In the scope of this paper, open source CityGML data for the city of Aachen, Germany (Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen, Ref 324 * Geoinformationszentrum 2017) is considered for further demonstrations. The implementation of the CityATB was carried out using PyQt (PyQt 2012) bindings for Python 3.5 and above.

CITYGML AND APPLICATION DOMAIN EXTENSION

City Geographical Markup Language (CityGML), an open Urban Information Modelling standard, is based on a modular XML schema structure. CityGML complies to the ISO 191xx family, the Open Geospatial Consortium (OGC), the W3C Consortium, the Web 3D Consortium and the OASIS standards. With 13 thematic extensions modules, the geometrical, semantic, appearance and topographical information of city objects representing cities, districts and individual buildings can be stored and exchanged using CityGML modelling standard (Gröger, et al. 2012). Depending upon the amount of information present in individual model, five Levels of Detail (LoD), as shown in *Table 1*, can be defined for CityGML.

The **Application Domain Extension (ADE)**, extends the core CityGML data models for multiple implementations (Gröger, et al. 2012). For energy performance simulations at city or district level, the building data models can be extended using the **Energy Application Domain Extension (Energy ADE)** (Agugiaro, et al. 2018). Similar to the modular structured CityGML data models, the Energy ADE extends the core city objects with the building physics

information, occupant schedules, material and construction, energy systems and with other information such as weather data.

Table 5: Overview of the five Levels of Detail for CityGML. Information retrieved from (Malhotra, et al. 2019)

Overview of LoD concept in CityGML (LoD0 – LoD4)	
	LOD0 (2.5D model definition) <ul style="list-style-type: none"> Regional and landscape scale representation Lowest accuracy No information over building installations Information about roof representations available No information about city furniture
	LOD1 <ul style="list-style-type: none"> City and region scale representation 5/5m 3D point accuracy (Low) Object blocks as generalised features (>6*6m/3m) Flat roof structures No information over building installations and city furniture
	LOD2 <ul style="list-style-type: none"> City, districts and project scale representation 2/2m 3D point accuracy (Middle) Objects as generalised features (>4*4m/2m) Differentiated roof representations Information over building installations available City furniture as prototypes, generalized objects
	LoD3 <ul style="list-style-type: none"> City districts, exterior architectural models, landmark scale representation 0.5/0.5m 3D point accuracy (High) Object as real features (>2*2m/1m) Building installations as exterior features Real object form for roof structures and city furniture
	LOD4 <ul style="list-style-type: none"> Interior architectural models, landmark representation 0.2/0.2m 3D point accuracy (Very High) Constructive elements and openings are represented Real object forms for building installations, roof structures and city furniture

To increase the use of CityGML data models for energy simulations and other multi-domain applications, a toolbox (*CityATB: CityGML Analysis Toolbox*) is developed. This tool will enhance the user's flexibility to pre-process and disseminate 3D models from a city to an individual building level. In the next sections, a detailed functionality of the *CityATB* will be discussed.

CITYATB: CITYGML ANALYSIS TOOLBOX

The *CityATB*'s user friendly architecture is structured according to different functionalities which can be used depending upon the application. A brief overview and further definitions of the different modules is made in the sections below.

For demonstration purposes in this paper, firstly an analysis of the open source data for the city region of Aachen is made. This functionality gives an overview of the number of buildings, along with some more attributes, and is further discussed in the section

analysis. Once the analysis is carried out, a search algorithm on the basis of coordinates and building usage is done. Furthermore, the desired area is exported as a new CityGML dataset and is again analysed. After analysis, the dataset is validated according to the CityGML standard schema. Furthermore, a time comparison with respect to the number of buildings is made for the different functionalities.

CityATB Main Window

The *CityATB*'s main window allows the users to navigate through the different modules and functions of the toolbox. With the independent implementation of individual functionalities and structure, the users of the tool will have a much larger flexibility in order to use CityGML datasets for wide range of applications.

Searching the appropriate buildings

Generally, CityGML datasets are a coagulation of tens of thousands of buildings clumped together in order to represent a large section as a city-quarter or the complete city itself. Moreover, it is often quite difficult to extract a small or large number of appropriate buildings for analysis and simulation purposes. This problem however results in higher computational effort and costs. The search module allows the user to narrow down the corresponding dataset. This can be carried out by entering a specific value, such as address or building functions and/or the coordinates of the area in which the building(s) are intended to be present. The search module of the *CityATB* allows the user to input the coordinates in different coordinate reference systems (CRS) using the EPSG Geodetic Parameter Dataset (IOGP Geomatics Committee 2020). Therefore, transformations within individual CRS are also possible.

Within the scope of this paper, open source CityGML LoD2 datasets for the city of Aachen, Germany from (Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen, Ref 324 * Geoinformationszentrum 2017) are considered. The large dataset for the city region of Aachen contained 840 individual CityGML files which have 332,159 buildings and a size of approximately 6 GB in total. The analysis of the dataset was done using the Analysis module of the *CityATB* which is described in detail in the next section. A preliminary analysis gave the number of buildings inside each individual file along with their versions, coordinate reference system and the levels of detail.

For demonstration of the search algorithm, two techniques were used. Firstly, for searching the appropriate buildings or area, geographical coordinates from a web mapping service (in this case Google Maps (Google Maps 2020)) were taken and individually entered in the tool. The longitudes and latitudes of each geographical point are translated automatically inside the tool into the vertices of a

polygon. With an automated algorithm to convert the coordinates from Google maps to the respective CityGML file, a polygon is algorithmically created within the toolbox. Furthermore, an initial sorting of coordinates is carried out by computing the centroid of the area and then listing the coordinates by polar angle. The algorithm then compares the entered order with the sorted order for e.g. if the user enters 4 points P1, P2, P3, P4. The algorithm sorts and compares the two lists: if the two lists have the same order (or reversed order) and a different “first” point, such as: P2, P3, P4, P1, the programme will just continue; else the programme will ask the user if they would like to use the suggested or the entered order. For creating a closed polygon, a minimum of three vertices are required. Once the polygon is created, the search can be carried out to extract the desired buildings/area.

Figure 1 gives a visual representation of the buildings searched and outputted using the geographical



Figure 1: Visualization of the output file from the search algorithm. This will be referred as D1 for further demonstrations.

coordinates. This resulting dataset (further referred as D1) will be used for functional demonstrations within this paper. For visualizations of 3D city models, the authors used the FZK Viewer (IAI 2019) to input and visualize CityGML data models.

Using the second approach, different buildings on the basis of their usage/function/type were extracted. This

functionality could also be used with attributes such as addresses, number of storeys, etc. Within the CityGML standard, the definition of the attributes such as building usage, roof types and many more are made in separate code-lists. The code space element of the desired attribute identifies the code list through a globally unique URL. (Gröger, et al. 2012) Therefore, firstly buildings (as shown in Figure 2) with the modelled usage of a Tenement (CityGML Building usage codelist codespace: 31001_1010), from the larger dataset D1 were segregated into a new file.



Figure 2: Visualization of the buildings modelled as tenement within the dataset D1



Figure 3: Visualization of the buildings modelled as offices within the dataset D1.

Table 2: An overview of the number of buildings and building parts modelled as offices or tenements in the output dataset of the coordinate search.

Dataset type	Codelist Codespace	Buildings	Building Parts	File Size (MB)
D1 (output of coordinate search)	-	2404	2798	72
Tenement Buildings	1010	838	1244	27
Office Buildings	1120	380	565	12
Residential	1000	1	0	0.13
Others	-	1185	989	-

Moreover, further segregation of the buildings (as shown in Figure 3) modelled as office buildings (codelist codespace: 31001_1120) was made. Once the offices and tenement buildings were located, new CityGML datasets, containing only the searched buildings were then outputted. This potentially, could save a lot of time and effort for the urban planners to analyse cities based on the building types. Table 2 gives an overview of the number of buildings and building parts modelled as Tenement or Offices in the target dataset D1.

Another important functionality of the CityATB is to scale the output area of a new dataset. As an example, if dataset D2 (as shown in Figure 4 (Left)) was searched using latitudes and longitudes, the desired building(s) are located and the geometrical area, using the geographical coordinates, is calculated. The user will have the flexibility to extend the original area by a factor between 1-100%. Once the incremental factor of the area is given by the user (for demonstration an increase of 50% was made), the algorithm will locate the buildings within the increased area and this could be outputted into a new CityGML file. A minimum input of three geographical points is necessary to search and extend the desired area. Figure 4 demonstrates a small extracted area in the city region Aachen. The buildings on the left were located using the geographical coordinates and the buildings on the right were outputted using the scaling algorithm. The area was scaled to increase by 50% compared to the original size.

The scaling for a new CityGML dataset was implemented using the Gauss theorem of area calculation of a polygon with known vertices (Meister 1769). According to which the area of a polygon can be calculated using (eq. 1),

$$A = \frac{1}{2} * \left| \sum_{i=1}^{n-1} (x_i y_{i+1}) + x_n y_1 - \sum_{i=1}^{n-1} (x_{i+1} y_i) - x_1 y_n \right| \quad (eq. 1)$$

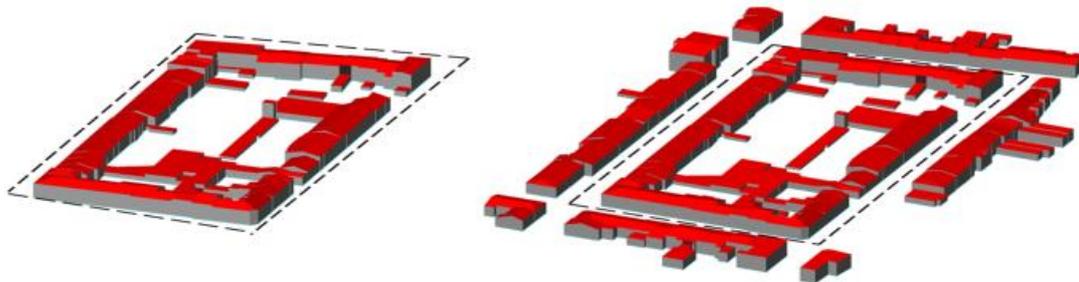


Figure 4: Visualization of the output dataset using the scaled function.

Left: The actual area for which the coordinates were inputted.

Right: Using the scaling function, visualization of a new dataset scaled up by 50% from the original dataset.

where,

- A is the area of the polygon,
- n is the number of sides of the polygon
- $x_i, y_i, i = 1, 2, \dots, n$ are the ordered vertices of the polygon

which can be further simplified to (eq. 2),

$$A = \frac{1}{2} * |(x_1 y_2 + x_2 y_3 + \dots + x_{n-1} y_n) + x_n y_1 - (x_2 y_1 + x_3 y_2 + \dots + x_n y_{n-1}) - x_1 y_n| \quad (eq.2)$$

The scalability feature of the CityATB will allow the experts of multiple domains to use CityGML data models for many different applications. Obtaining the desired building(s)/area and further extending the data model with a domain specific extensions (ADE) will largely enhance the usability and accessibility in the planning and simulation phases. Some of the examples of such applications could be flood analysis, traffic, noise, air quality simulations.

Analysis

Independent to the different functionalities of the CityATB, large datasets can be analyzed before/after using any of the other functions. Using the analysis function, large data sets are discretely defined in a tabular form on the basis of the filenames, number of CityObjects (these are the elements that constitutes a CityObjectGroup in CityGML and are modelled using the Composite Designed Pattern from software engineering (Gamma, et al. 1995)), number of Buildings (geometrical models containing the details of individual built or unbuilt structures, represented as a Building feature) and BuildingParts (small underlying sections of a complex dismantled building structure; is modelled if the building is not homogenous or sometimes due to administrative

aspects), the levels of detail (LoD) (as explained in the CityGML section) in which the file is available, CityGML version (current developments are based on version 1.0 and 2.0), the coordinate reference system (used to geo-reference individual geometry elements) and file size (in Megabytes (MB)) in which the dataset has been defined.

Figure 5 gives an example overview of the analysis output from the dataset of Aachen. The results of the analysis can be stored for further usage into different formats. This is discussed in the Saving Results section.

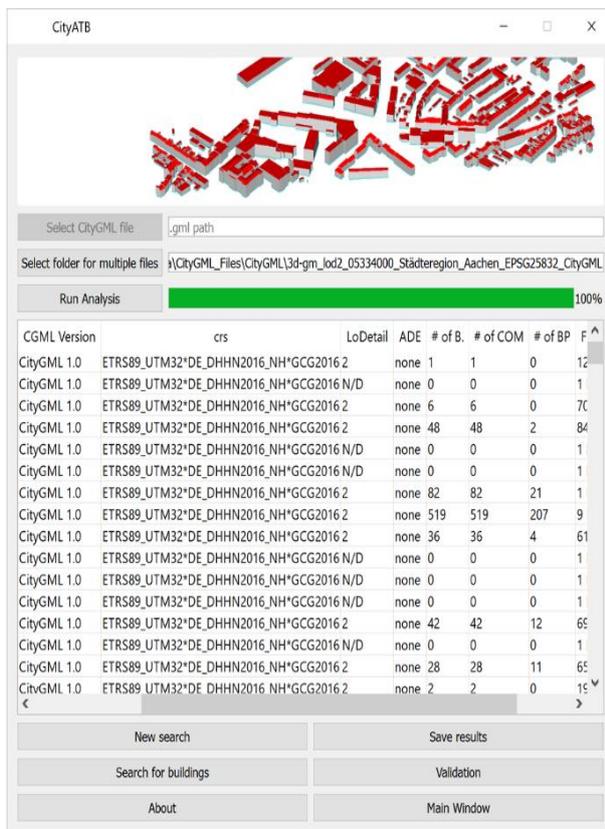


Figure 5: Example analysis result for the open source

The analysis of the open-source data for the city region of Aachen gave a detailed insight of the amount of buildings individual the dataset contains. Out of 840 datasets, 147 datasets did not contain any buildings or information. This number represents 17,5% of the total datasets and more importantly could potentially consume a lot of computational time and effort when inputting for urban scale simulations. Figure 6 gives a distribution of buildings in individual datasets.

Presently, the analysis function can be used for a single dataset or a folder containing multiple datasets and in future will also support the parsing functionality of the compressed ZIP files.

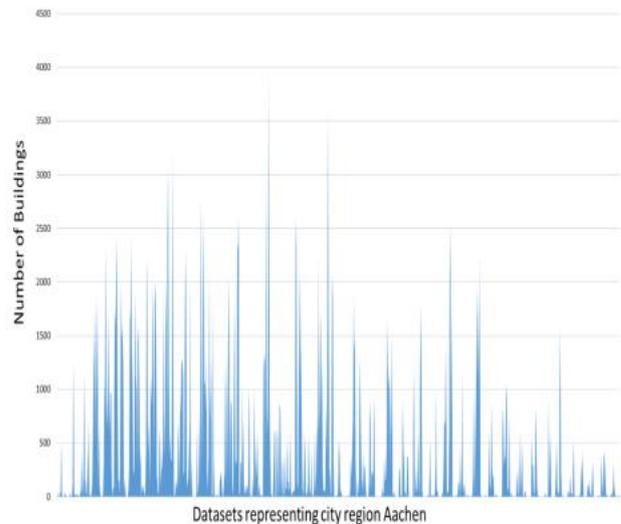


Figure 6: Distribution of the number of buildings per dataset

Validation

The functionality of the CityATB is based on the schema specific validation of the CityGML datasets. Generally, CityGML datasets (originated from the XML format) can be validated against the standards specified in the XML schema definitions (XSDs). Therefore, the validation of the user selected dataset is carried out using the inbuilt core CityGML schemas, currently implemented for versions 1.0 and 2.0. Furthermore, buildings or datasets which are extended using the Energy ADE and contain energy specific data can be validated against the CityGML 2.0 Standard along with the Energy ADE schema. Consequently, datasets can also be validated against user selected schemas. An json example output of the extracted file is shown below.

```
{ "CGML-ATB validation": {
  "LoD2_288_5631_1_NW.xml": {
    "schemaName": "CityGML1.0.xsd",
    "valid": "Valid!",
    "error": "None"},
  "LoD2_297_5630_1_NW.xml": {
    "schemaName": "CityGML1.0.xsd",
    "valid": "Valid!",
    "error": "None"}}}
```

An example of the validation output saved in json format.

A tabular form output within the toolbox window displays the details of the validation files along with the validation results. Furthermore, the detailed error description (as shown above) of the invalid files can be found in the exported results (explained in the next section). The analysis function can again be used to output different attributes of the valid dataset.

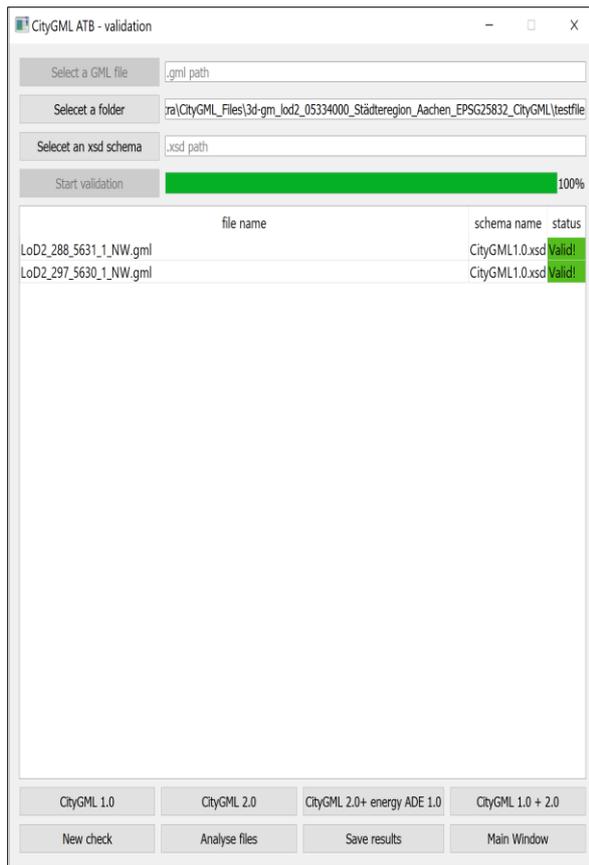


Figure 7: An example of the Validation Window

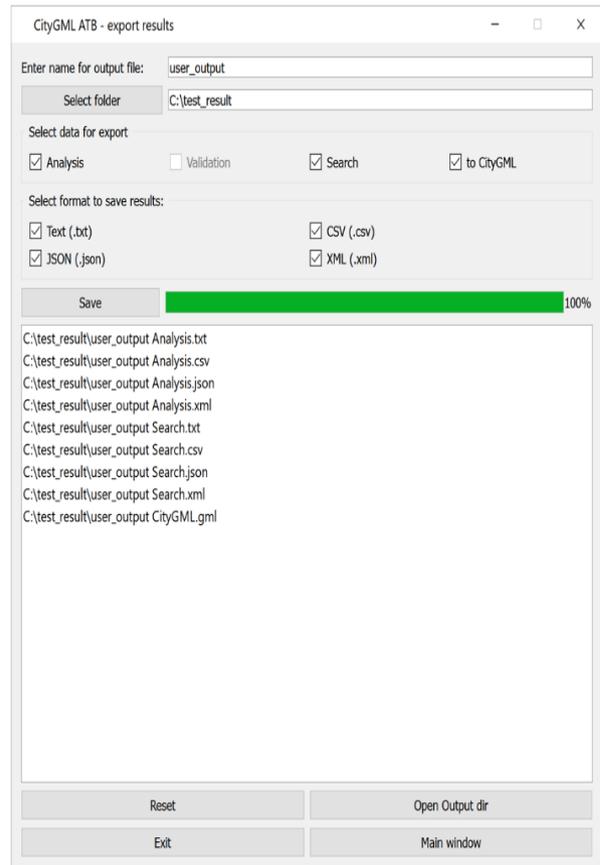


Figure 8: Window showing the saving of results.

Saving Results

Using CityATB, the users can save the results of each of the functionalities (search, analysis, validation) into multiple industry friendly formats.

Table 3, gives an overview of the input and output data formats that are supported by CityATB. In order to save the results from different functions, the user needs to select the functions along with the format in which the output data should be stored.

Table 3: Information about the input and out data formats supported by CityATB

Input	Output
CityGML	Comma separated value files (.csv)
XML	JavaScript object notation (.json)
	Extensible mark-up language (.xml)
	Text files (.txt)
	CityGML (v 1.0 and 2.0)

Although the name and directory of the file to be saved is set to pre-default, it can be selected and changed by the user. Once the selection of the output results and the format in which the results are intended to be saved is made by the user, the output file path is shown in the window.

The motivation behind the support of multiple data formats of the CityATB is to enhance the user’s flexibility to further use the data for energy- or simulation-based applications. Governmental organization and many industrial partners mainly use “.csv”, “.txt” and “.xml” formats, whereas, research institutions and simulation scientists are more inclined towards using “.json” and “.gml” datasets. In future, the authors would like to add the functionality of plotting and saving the analysis results into different picture formats (such as jpeg, png). Therefore, this feature will help a wide range of implementers to analyze and use the exported data.

Time Comparison

In order to optimize the accessibility and functionality of using large CityGML datasets, computational time calculation is one of the important key performance indicator. Moreover, the trade-off between scalability and efficiency on one hand and portability and transformability on the other is one of the core challenges in the scientific community (Pflüger, et al. 2016). High performance computing along with multi-core processing is the main focus of the community in order to optimize the time effectiveness in different applications (Wyngaard, et al. 2013).

As CityATB is developed with the focus of optimizing the time and effort for pre-processing large datasets in urban scale energy applications, time comparison graphs for the different functionalities highlighting the computational time with respect to the number of buildings is shown below. For demonstration of the execution time (in Figure 9, 11 and 12), dataset D1 was considered as the reference area. Furthermore, along with D1, the datasets extracted using the search algorithm (as shown in Figure 2 and 3) were considered to compare the execution times. One of the datasets consisted of buildings modelled as offices (380 buildings) and the other dataset consisted of buildings modelled as tenement (838 buildings). Moreover, comparison for computational times (in Figure 10) for the building(s)/area searched using geographical coordinates was also made. Using the open source data of the city region Aachen, out of 332,159 buildings, smaller areas with 42, 635, 1564 and 3515 buildings were extracted.

These smaller areas that were selected to compare the computation times were extracted using the CityATB's (geographical polygon) search module. For searching 42 buildings (using 5 coordinate points), the algorithm took 392.59 seconds. Whereas, for 635 buildings (using 12 coordinate points), 1564 buildings (20 coordinate points) and 3515 buildings (using 35 coordinate points) the searching time was 393.26 seconds, 393.58 seconds and 413.92 seconds respectively. However, comparing to the value search the computational time for coordinate search was higher. This is due to the pre-processing of the coordinates into the respective reference systems and thereafter searching of the appropriate buildings in the user defined area. Moreover, the analysis and validation of the buildings within the dataset D1, showed an approximate linear increase in the time with respect to the number of buildings. In future, the authors would also like to implement and test the algorithms using multiprocessing computations.

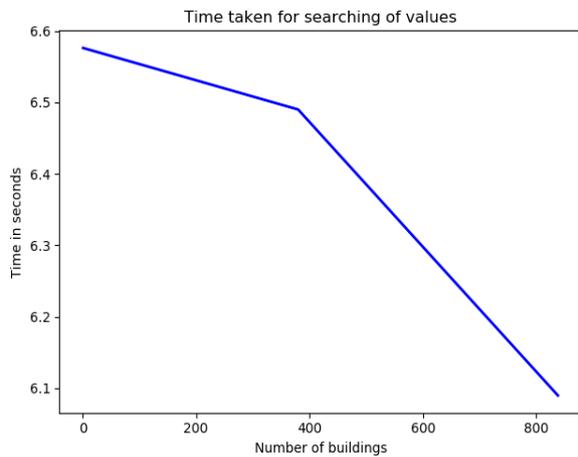


Figure 9: Graph showing the amount of time taken for searching of building using the value search.

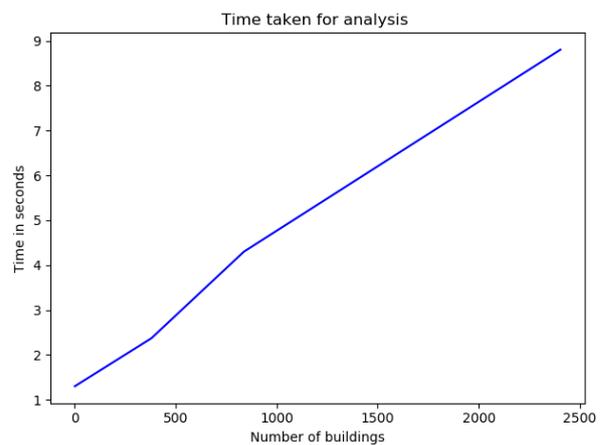


Figure 11: Graph showing the amount of time taken for analyzing different buildings.

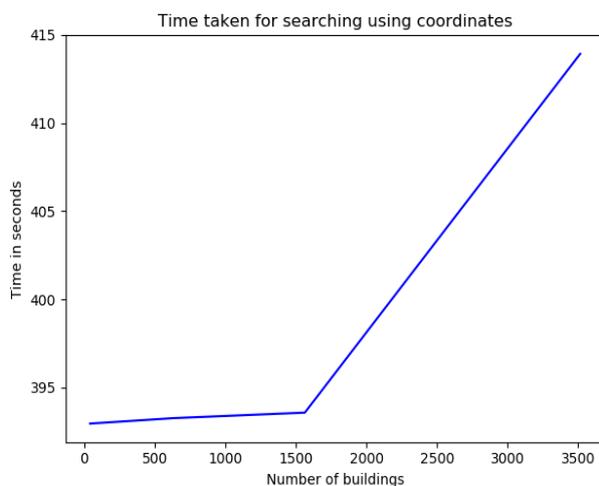


Figure 10: Graph showing the amount of time taken for searching different buildings with geographical coordinates.

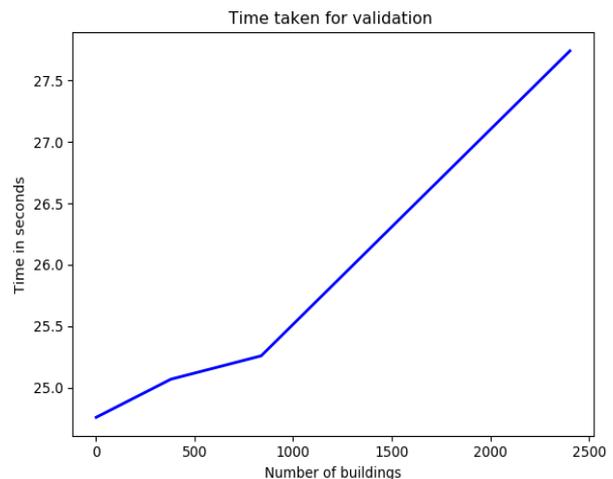


Figure 12: Graph showing the amount of time taken for validating different buildings.

CONCLUSION

Urban scale energy simulations are often quite complex and do require a large amount of data imports and exports. In order to improve the efficiency of our simulation tools, extraction and transformation of the appropriate data model is very important. With CityATB, the authors were able to accomplish the desired data model segregation which further helped and drastically reduced the importing, computational and exporting time for urban scale energy simulations using Modelica (Mattsson and Elmqvist 1997). Nevertheless, the simulations could also be facilitated by many other simulation environments and tools such as EnergyPlus (NREL 2019) or TRNSYS (Klein, et al. 2017) which support the input functionality of CityGML data models (Geiger, et al. 2019). Due to data protection laws in different countries, the authors restrict to open the information of the exact coordinates or addresses of the datasets used. Therefore, random coordinates were chosen for using the open source data models. Moreover, due to the user-friendly architecture and provision of detailed documentation of the tool, the authors believe that this toolbox could be used by beginners and expert users alike. Furthermore, this tool, which will be available as open source (<https://gitlab.e3d.rwth-aachen.de/e3d-software-tools/cityatb>), and can be extended for further requirements and applications. With the possibility to adapt different requirements of the users, as the next steps, developments such as automatic conversion of CityGML versions, geometrical transformations, datasets merge function integration are envisioned by the authors. Moreover, a web-based functionality to import and export open source data models is also foreseen.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank all the partners of the Energy ADE and IBPSA Project1 consortium for the detailed and helpful discussions.

REFERENCES

- Agugiaro, G., J. Benner, P. Cipriano, und R. Nouvel. „The Energy Application Domain Extension for CityGML: enhancing interoperability for urban energy simulations.“ *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 5. March 2018.
- Economic and Social Council. *Special edition: progress towards the Sustainable*. United Nations, 2019.
- Gamma, E., R. Helm, R. Johnson, und J. Vlissides. *Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software*. Addison-Wesley, 1995.
- Geiger, A., J. Benner, K. H. Häfele, und V. Hagenmeyer. „Building Energy Simulations at Urban Scale Based on Standardised Data Models.“ *Proceedings of Building Simulation 2019: 16th Conference of IBPSA*. Rome: IBPSA, 2019.
- Google Maps. *Aachen, Germany*. 2020. <https://www.google.de/maps/place/Aachen/@50.7596743,5.9564408,11z/data=d50.7753455!4d6.0838868> (Zugriff am 03. February 2020).
- Gröger, G., T.H. Kolbe, C. Nagel, und K.H. Häfele. *OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard*. OGC, 2012.
- IAI, KIT. *FZKViewer (5.2)*. 2019. March 2019. <https://www.iai.kit.edu/1302.php> (Zugriff am 19. February 2020).
- IOGP Geomatics Committee . *GeoRepository*. 2020. <https://epsg.org/home.html> (Zugriff am 02. 02 2020).
- Klein, S.A., Beckman WA, Mitchell JW, und et al. *TRNSYS 18: A Transient System Simulation Program*. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA, 2017.
- Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen, Ref 324 * Geoinformationszentrum. <https://www.opengeodata.nrw.de>. 2017. https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/3d-gm/3d-gm_lod2/ (Zugriff am 30. January 2020).
- Malhotra, A., M. Shamovich, J. Frisch, und C. van Treeck. „Parametric Study of different Levels of Detail of CityGML and Energy ADE Information for Energy Performance Simulations.“ *IBPSA Building Simulation*. Rome, 2019.
- Mattsson, S.E., und H. Elmqvist. „Modelica - An international effort to design the next generation modeling language.“ *7th IFAC Symposium on Computer Aided Control Systems Design*. Ghent, Belgium: CACSD'97., 1997.
- Meister, A. L. F. „Generalia de genesi figurarum planarum et inde pendentibus earum affectionibus.“ *Nov. Com. Gött. (in Latin)*, 1769: 1-144.
- NREL. *EnergyPlus*. 27. March 2019. <https://energyplus.net/> (Zugriff am 21. July 2019).
- Pflüger, D., et al. „The Scalability-Efficiency/Maintainability-Portability Trade-Off in Simulation Software Engineering: Examples and a Preliminary Systematic Literature Review.“ *Fourth International Workshop*. Salt Lake City: SE-HPCCSE, 2016. 26-34.
- PyQt. „PyQt Referencing Guide.“ 2012.
- Wyngaard, J., M. Inggis, J. Collins, und B. Farrimond. „Towards a many-core architecture for HPC.“ *23rd International Conference on Field programmable Logic and Applications*. Portugal: IEEE , 2013.

MODEL-BASED URBAN PLANNING AS BASE OF URBAN PERFORMANCE SIMULATION

S. Ebertshäuser¹ und P. von Both¹

¹Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Deutschland

ABSTRACT

As complexity in terms of pressure, e.g. to achieve time-framed global goals regarding climate change, diversity, e.g. of different themes or involved stakeholder, duration, e.g. of planning phases as well as corresponding planning horizons, is continuously on the rise, an integrated planning of urban (energy) systems has to be increasingly supported by IT-based planning and simulation tools. Up to now various existing simulation tools share a common problem as their capabilities rely on the data that is available for the local situation that shall be analyzed. Here, there often is a lack of comprehensive and up-to-date information on the build environment and energy-related infrastructure as needed for input to the energetic simulation. On side of assessment methods typology data can help to fill the information gaps in available local data. However, again due to missing common data the compilation of these typological information on base of literature data is often individually done by experts in a locally specific manner that can't be generalized.

In order to address this problem field an ongoing research project pursues solutions for energetic urban simulation that base to the most extend on established standards. For the side of simulation technology on the level of building there has been vast developments in standardized and therefore interchangeable performance simulation technology within the framework of Modelica. As effort to buildup component libraries for the building performance simulation on a common base has been accomplished to some extend and is currently further optimized (c.f. IBPSA Project 1), the next frontier for developed libraries is to be applied in the simulation on the urban scale. On side of planning parameters bidirectional exchanged with simulation by means of extended CityGML-models builds the target regarding standardization. In this contribution a tool chain to support urban energy planning following this approach is presented.

EINLEITUNG

In Bezug auf den Handlungsdruck, bspw. ausgehend von festgelegten globalen Klimaschutzziele, der Vielfalt, z.B. diversifizierender Themenfelder oder

beteiligter Stakeholder, der Dauer, bspw. von langwierigen Planungsphasen sowie entsprechender Planungshorizonte, nimmt die Komplexität (kommunaler) Planungsaufgaben stetig zu. Eine integrierte Planung von Stadt- (Energie-) Systemen erfordert daher zunehmend die Unterstützung durch IT-basierte Planungs- und Simulationswerkzeuge. Eine gemeinsame Herausforderung teilen sich die verschiedenen, vorhandenen Stadtsimulationswerkzeuge, da ihre Fähigkeiten auf den Daten beruhen, die für die zu analysierende lokale Situation verfügbar sind. Hier fehlen häufig umfassende und aktuelle Informationen zur Bestandsbebauung und zur energiebezogenen Infrastruktur, die für die Eingabe in die energetische Simulation erforderlich sind. Auf der Seite von den auf Quartierssimulationen aufbauenden Bewertungsmethoden besteht daher ein Bedarf an Typologiedaten, die dazu beitragen können, die Informationslücken in den für den lokalen Kontext verfügbaren Daten zu schließen.

Aufgrund fehlender gemeinsamer (normierter) Methoden und Vorgehensweisen wird die Zusammenstellung dieser typologischen Informationen auf der Grundlage von Literaturdaten jedoch häufig von Experten auf lokal spezifische Weise individuell durchgeführt, die oftmals nicht repliziert sowie nicht für andere Kontexte generalisiert werden kann.

In einem laufenden Forschungsprojekt, das sich mit diesem Problemfeld befasst, werden Lösungen für die energetische Stadtsimulation verfolgt, die weitestgehend auf etablierten Standards basieren (siehe Abbildung 1, die den Ansatz des Projekts darstellt). Damit soll auf einem normierten Rahmenwerk aufgebaut werden das insbesondere für die langandauernden kommunalen Planungsprozesse mit der Vielzahl an beteiligten Akteuren und Fülle an einzubeziehenden Themen und Aspekten einer transparenten, einheitlichen Datenbasis bedarf. Um dabei den besonderen Anforderungen der Datenhaltung im kommunalen Umfeld, wie beispielsweise einer Langzeitarchivierung, gerecht zu werden, stellt ein Schwerpunkt der Untersuchungen im Projekt die Rückführung der simulierten

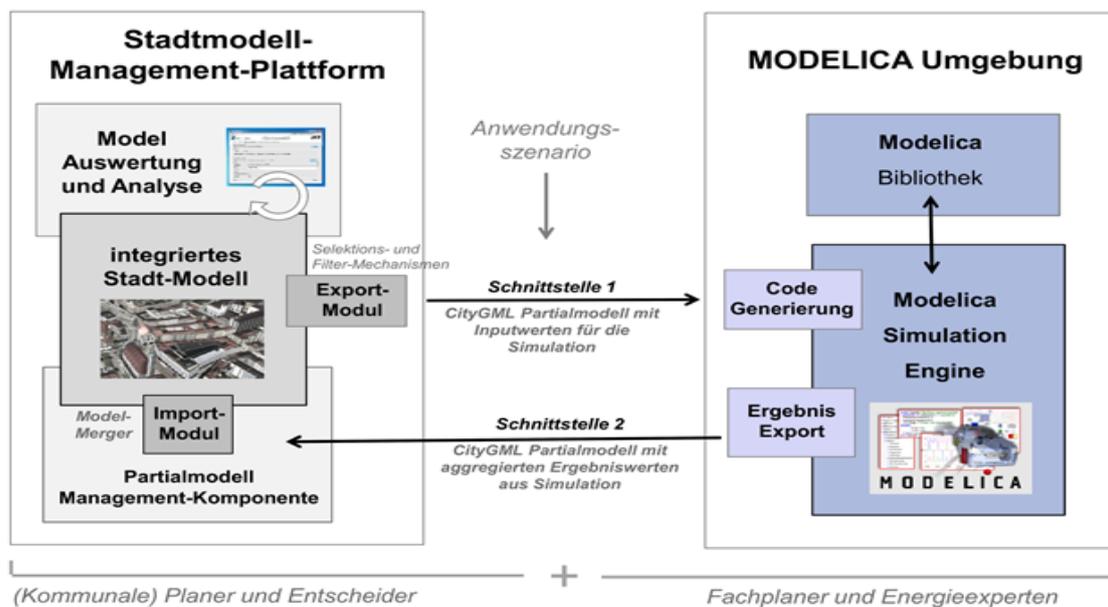


Abbildung 1: angestrebter Ziel-Prozess des Verbundvorhabens

Ergebnisse in die standardbasierten Stadtmodelle der Kommunalplanung dar. Ein erster wichtiger Schritt im Forschungsprojekt war es basierend auf einem thematischen Anwendungsszenario einen Datenaustauschprozess zwischen der Stadtplanung und der Fachplanung zu spezifizieren. Worin die Fachplanung durch die Eingabe von (lückenhafter) Ausgangsinformationen zur lokalen Situation aus dem Stadtmodell in befähigt wird mittels Simulationenwerkzeugen (auch unter Hinzunahme von Typologiedaten) die energetischen Informationen zu Quartier aufzubereiten und in das Stadtmodell zurückzuführen. Mit einem Anwendungsfall zum Erstellen von Varianten für Fernwärmevorranggebieten konnte ein geeignetes Szenario vor dem Hintergrund der Bauleitplanung hierfür spezifiziert werden (vgl. Ebertshäuser 2018). Darauf aufbauend stellt das Entwickeln einer geeigneten formalen Abbildung der auszutauschenden Information den zentralen methodischen Angelpunkt im Forschungsprojekt dar. Hierzu konnte im folgenden Schritt für den in der Stadtplanung etablierten Modellstandard CityGML sowie unter Einbezug erster Ansätze zu dessen Einsatz als Grundlage der energetischen Stadtsimulation eine entsprechende Modellerweiterung entwickelt und umgesetzt werden (vgl. Ebertshäuser 2019).

In diesem Beitrag werden Ergebnisse vorgestellt, die auf dem für den Anwendungsfall (und damit auch für eine generelle Verwendung von Typologiedaten in energetischen Stadtsimulation) erweiterten Stadtmodellschema aufbauen. Nachdem im folgenden Kapitel **METHODEN** zunächst auf wesentlichen Gesichtspunkte dieser zugrundeliegenden methodischen Grundlage eingegangen wird, kann die korrespondierende Funktionalität der im Projekt auf Seite der Stadtplanung entwickelten Werkzeuge zur Handhabung des erweiterten Stadtmodells daran dargestellt werden (vgl. Kapitel **ERGEBNISSE**).

Diese Werkzeuge bilden dabei mit den auf Seite der Simulation stehenden Werkzeugen eine an der gemeinsamen Schnittstelle des erweiterten Stadtmodellschemas zusammenschaltbaren Werkzeugkette zur transparenten Planungsunterstützung der kommunalen Stadtplaner. Indem die Werkzeugkette auf offenen Standards sowie frei verfügbaren Werkzeugen aufbaut soll den Planenden im Rahmen der energetischen Stadtplanung demonstriert werden wie selbstständig offene, modellbasiert erarbeitete Lösungen zu ihren energetischen Fragestellungen aussehen können. Durch Mitarbeit der Forschungspartner in den Standardisierungsgremien sowie innerhalb von IBPSA laufenden internationalen Rahmenprojekten können praxisrelevante Generalisierung der im Rahmen des Projekts im thematischen Fokus des Anwendungsfalls umgesetzte Lösungen diskutiert und eingebracht werden.

METHODEN

Seitens der Simulationstechnologie auf Bauwerksebene fanden in den letzten Jahren im Rahmen der offenen Simulationssprache Modelica [1] enorme Entwicklungen bezüglich den als Komponentenmodelle generalisierbaren und daher gut untereinander kombinierbaren Ansätzen zur energetischen Simulation der Gebäudeperformance (engl. Building Performance Simulation – BPS) statt. Der diesen zugrundeliegende, im Bereich der Automobilproduktion entwickelte objektorientierte Simulationsstandard Modelica ermöglicht dabei eine Grundstruktur der Simulationsmodelle in Komponenten [2]. Für die BPS sind forschungsseitig verschiedene offene Modelica-Bibliotheken entstanden [13] und Bestrebungen unternommen worden diese auf eine gemeinsame (generalisierte) Grundlage zu stellen [3]. Prinzipiell sollen damit Simulationsmodelle für ein Gebäude ermöglicht werden, die bedarfsorientiert aus verschiedenen

Komponentenmodellen der unterschiedlichen Bibliotheken zusammengesetzt werden können. In einem Rahmenprojekt der internationalen Energieagentur (vgl. Annex 60) wurde hierzu eine Basisbibliothek erstellt und in verschiedenen der bestehenden Komponentenbibliotheken umgesetzt. Diese Generalisierungsbestrebungen werden derzeit in internationalen Folgeprojekten weiter optimiert [4]. Dabei besteht die nächste anwendungstechnische Herausforderung der (weiter-) entwickelten Bibliotheken darin, die beinhaltenen Gebäudesimulationsmodelle für eine Simulation im städtischen Maßstab zu kombinieren.

Im Rahmen des diesem Beitrag zugrundeliegenden Forschungsprojekts ist von seitens der Simulationsexperten ein Partner beteiligt, der eine dieser Modelica-Bibliotheken sowie ein Werkzeug zur Stapelverarbeitung von beinhaltenen Bauwerksmodellen im Rahmen einer Quartierssimulation entwickelt. Zur Optimierung der bisher dabei aufwändigen sowie tabellenbasierten Datenaufbereitung von Informationen zur lokalen Situation wurde im Projekt die auf einem 3D-Stadtmodellstandard basierend entwickelte Schnittstelle zum direkten Import kommunaler Modelldaten bei der Parametrisierung der einzelnen Modelica Simulationsmodelle implementiert (vgl. Abbildung 2).

Bei den in der Stadtplanung und -entwicklung verwendeten Geodaten konnte sich mit dem durch das Open Geospatial Consortium (OGC) standardisierten, objektorientierten Stadtmodellschema CityGML [5] eine gemeinsame Sprache für die Zusammenführung und den Austausch unterschiedlicher kommunaler Informationen im Stadtplanungsprozess etablieren. Die Standardisierungsinitiative SIG3D ist die treibende Kraft bei der Entwicklung dieses OGC-normierten Standards [6]. Bezüglich der Datenintegration als einheitlicher Ansatzpunkt der Simulationsansätze auf Quartiersebene bietet CityGML aufgrund seiner Verbreitung einen robusten offenen Standard innerhalb der heterogenen Landschaft der zur Haltung der kommunalen Informationen von den Kommunen implementierten GIS-Datenbanken. Unter anderem auch vom Erfolg der Top-Down-Initiative INSPIRE der Europäischen Union zur Standardisierung (geobasierter kommunaler) Daten [7] sowie ihrer nationalen Umsetzungsinitiative GDI-DE [8] (aus der heraus SIG3D gegründet wurde) getrieben, haben viele Kommunen bereits Datenbanken aufgebaut, die CityGML importieren bzw. exportieren können oder nativ darauf aufbauen. Als etablierte Quelle für 3D-Informationen zur bebauten Umwelt ist der Stadtmodellstandard prädestiniert für die (energetische) Performance Simulation auf Quartiersebene. Dabei können vor dem Hintergrund der Verwendung von CityGML zur Beschreibung der ansonsten in unterschiedlichen Formaten vorgehaltenen Informationen Bestrebungen zur einheitlichen Datenerfassung als Basis der

Quartierssimulation sowie zur Vergleichbarkeit der Simulationsergebnisse gebündelt werden.

Im Kern des CityGML-Schemas steht das Detailierungskonzept zur Modellierung (semantischer und geometrischer) Informationen in verschiedenen Granularitäten (engl. Level of Detail – LOD). Im Prinzip ermöglicht dies eine in einem Stadtmodell integrierte Abbildung verschiedener Datentiefen und Informationsgranularitäten. Einer in der Praxis oftmals fragmentiert in verschiedenen Modellen und Datenformaten vorzufindende verteilte Information zur lokalen Situation, welche prägend für die Datenverfügbarkeit in den Kommunen ist, kann damit zugunsten einer einheitlichen, transparenten und konvergenten Datenbasis entgegengewirkt werden.

Trotz einer kontinuierlichen Verbesserung dieses Stadtmodellschemas fehlen zu den im Standard beschreibbaren Stadtobjekten immer noch Darstellungskonzepte für literaturbasierte Daten (z.B. typologische Gebäudeinformationen), die es ermöglichen können neben den geometrischen Detailgraden auch bzgl. der Datenverfügbarkeit orientierte Information abzubilden. Damit ließe sich nachvollziehbar (auch im Sinne einer Nachweisführung) die Lücke häufig lokal fehlender gebäudespezifischer Daten schließen, wie oben für die energetische Stadtsimulation skizziert. Mit der Application Development Extension (ADE) bietet CityGML einen normierten standardkonformen Erweiterungsmechanismus, der auch offiziell von der Standardisierungsorganisation verwendet wird, um die Modellsemantik in der aktuellen Version als Vorbereitung für die nächste Version vorläufig zu optimieren und zu erweitern. In den letzten Jahren wurden aufgrund der vielschichtigen Nutzung von CityGML Entwicklungen von ADE zu dessen thematischen Erweiterung immer beliebter, um verschiedene Bereiche des kommunalen Informationsbedarfs mit speziell benötigter Semantik auf standardisierte strukturierte Weise im Stadtmodell abbilden zu können. Beispielsweise wird die ENERGY ADE von SIG3D offiziell für das breite thematische Feld der urbanen energetischen Information entwickelt [9]. Bei dieser ADE-Entwicklung wurde jedoch bisher der für den im Themenfeld wichtigen Aspekt einer Darstellung typologischer Daten noch nicht berücksichtigt. Ein diesbezüglicher Darstellungsbedarf findet sich beispielsweise in Informationen zur Gebäudetypologie mit weiteren Eigenschaften, die die einzelnen Archetypen im Stadtmodell darstellen und auf die dann die entsprechenden Gebäude referenzieren können. Da in der energetischen Quartierssimulation diese Informationen eine wichtige Rolle zur Abschätzung der für eine lokale Situation nicht verfügbaren Daten spielen, würde eine standardisierte Beschreibung dieser Basisdaten auch die Nachvollzieh- und Wiederverwendbarkeit simulierter Ergebnisse verbessern. Prinzipiell können Planungshilfsmittel die auf einem entsprechen erweiterten Stadtmodellstandard basieren die

Planenden bei der Bewältigung ihrer komplexen Aufgaben in transparenter Weise unterstützen.

In dem diesem Beitrag zugrundeliegenden Forschungsprojekt wurden mit einer Erweiterung des CityGML Standards zur Abbildung typologischer Daten im Rahmen einer ADE-Entwicklung die Informationsbedarfe der energetischen Quartierssimulation adressiert. Indem konsistente Verweise auf die in die Simulation eingegebene Daten bei ihrer Rückführung in das Stadtmodell ermöglicht werden, wird damit auch generell eine bessere Vergleichsmöglichkeit der Simulationsergebnisse verfolgt. Da es außer einem ADE Beispiel in der CityGML Standarddokumentation keine offizielle Norm gibt, die die Erzeugung einer ADE beschreibt, wurden verschiedene Entwicklungen untersucht [10] und eine aus verschiedenen erfolgreichen Ansätzen synthetisierte Methodik zur optimalen Erweiterung der CityGML-Strukturen bei der ADE Entwicklung im Projekt angewendet. Zusammen mit der Einbeziehung von Experten vom Standardisierungsgremium SIG3D bildet diese auf der Unified Modeling Language (UML) zur Abbildung der konzeptionellen Schemastrukturen basierende Methodik den (technischen) Kontext zur Generierung der entwickelten ADE mit dem beinhaltenen Darstellungskonzept für typologische Daten. Dabei umfasst der Informationsumfang der berücksichtigten Typologiedaten:

- a) Abbildungsbausteine für Methoden zur Typologieerzeugung
- b) Themenbereich Gebäude und Energie

Um den besten Mehrwert für die vorgeschlagene Informationsstruktur zu erzielen, wurde zunächst als Grundlage für die Abbildung der methodischen Bausteine einer Typologie, beispielsweise Klassifizierungsmerkmale wie Baualtersklassen, der Ansatz der TABULA-Gebäudetypologie [11] als Blaupause gewählt. Als (referenzierbare) veröffentlichte Methode hebt sie sich von der üblichen Praxis ab, die bisher von individuell auf die lokale Situation zugeschnittenen und damit schwer zu normalisierenden Ansätzen dominiert wird. Neben dem Aufgreifen gut generalisierbarer methodischer Grundlagen ist aufgrund der in der Kommunalplanung vorherrschenden Themenvielfalt für einen praxisrelevanten Vorschlag einer Datenschnittstelle die bedarfsgerechte Spezifizierung eines geeigneten Anwendungskontexts mit einer konsistenten Beschreibung des Datenaustauschszenarios und der beteiligten Akteure in der Stadtplanung von entscheidender Bedeutung. Der im Projekt entwickelten ADE zum bidirektionalen modellbasierten Datenaustausch zwischen den Stadtplanungsinstrumenten und den Simulationswerkzeugen liegt ein szenariobasierte Anwendungsfall zugrunde. Aus diesem, vor dem Hintergrund der kommunalen Bauleitplanung mit Fragestellungen zu Situation und Planung von Fernwärmegebieten stehende, domänenübergreifenden Datenaustauschprozess (siehe Abbildung 3 und Abbildung 3) wurden die Informationsbedarfe der Datenschnittstelle abgeleitet [12]. Damit den Stadtplaner die Werkzeuge auf Seite der Simulation über diese Datenschnittstelle

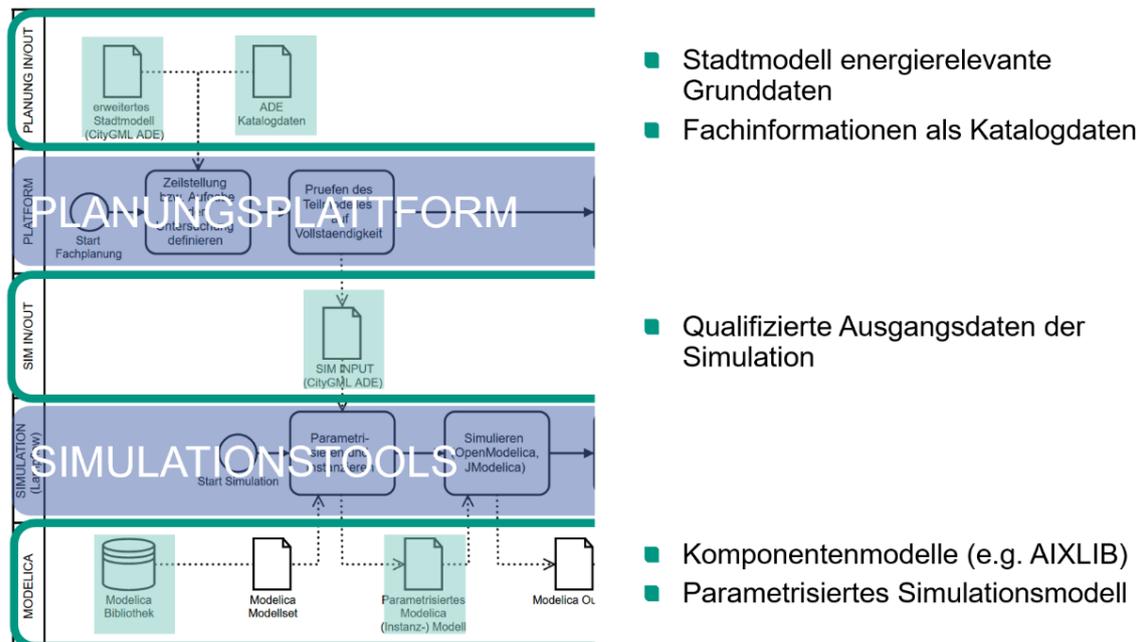


Abbildung 2 Modellbasierter Datenaustausch vom Simulationswerkzeug zur Stadtplanung

zugänglich gemacht werden kann, wurden im Projekt mit der Entwicklung ergänzender Werkzeuge eine Werkzeugkette als Planungsinstrument realisiert. Die im folgenden Kapitel dargestellten Hilfsmittel ermöglichen dabei den Planern die Vor- bzw. Nachbereitung der mittels des CityGML Modells ausgetauschten Planungsgegenstände und sind im Konzept einer Planungsplattform zusammengestellt; einerseits zur Handhabung des Modellformates, beispielsweise zur Extraktion und dem Export eines Teillausschnittes des Stadtmodells in Form eines Partialmodells als Simulationsinput, und andererseits mit Analysemöglichkeiten zur Auswertung und Aufbereitung der in das Stadtmodell zurückgeführten Simulationsergebnisse.

Mit diesen im Weiteren vorgestellten Werkzeugen wird im Projekt das Aufzeigen des Mehrwertes einer modellbasierten, transparenten Stadtplanung auf der Grundlage offener Datenstandards verfolgt. Im Anwendungskontext der Fernwärmeplanung kann dieser insbesondere bezüglich einer langfristigen Planungssicherheit und einer guten Kommunikation mit der lokalen Bevölkerung zum Tragen kommen. Die Werkzeuge werden nach Abschluss des Forschungsprojektes der interessierten Öffentlichkeit frei zur Verfügung gestellt.

ERGEBNISSE

Um Stadtplanende bei ihren energetischen Fragestellungen im Rahmen von Bestandsanalysen bezüglich der Fernwärmeversorgung bzw. dem entsprechenden im Stadtgebiet existierenden Potentials sowie der Prognose und Bewertung zukünftiger Ausbaupotentiale zu unterstützen stellen die Abbildung 4 und Abbildung 5 den durch Werkzeugkette realisierten Workflow dar. Dabei zielt eine Hauptfunktion der folgend vorgestellten, im

Forschungsprojekt entwickelten Werkzeuge auf das modellbasierte Anbinden von Simulationswerkzeugen an die einheitlich in einer CityGML Informationsbasis zusammengeführten und verwalteten Planungsdaten ab. In einer rahmengebenden Desktop-Softwareanwendung werden dabei zum einen die Handhabung des modellbasierten Planungsgegenstandes in Form des erweiterten CityGML Stadtmodells ermöglicht und zum anderen die Analysefunktionen für die von der Simulation in das Modell zurückgeführte Ergebnisse. Zur Erleichterung der Auswahl von Ausschnitten im Stadtmodell, die als Partialmodell dann in ein Dokument zur Übergabe an das Simulationswerkzeug exportiert werden können, wurde eine Visualisierungskomponente auf Basis der X3D Technologie umgesetzt. Beim X3D Standard handelt es sich um einen XML-basierten Szenegraphen, der für Webanwendungen ausgelegt ist. Die frei verfügbare Open Source Basiskomponente X3DOM ermöglicht es aufgrund ihrer vollständigen Realisierung in Javascript, dass die in das X3D-Format transformierten Modelldaten direkt in modernen Browsern angezeigt werden können. Da sich sowohl das erweiterte CityGML Stadtmodell wie auch X3D Dokumente die Basissyntax XML teilen, sind die Übersetzungsmethoden zwischen den beiden Formaten in XSLT standardbasiert umgesetzt. Die Anwender können mit dem Auswahlwerkzeug ein Stadtmodell laden und in dessen Visualisierung auf der Benutzeroberfläche dann mit dem Mauszeiger die Bauwerke bzw. den Ausschnitt zum Export markieren.

Aufgrund der bei 3D-Stadtmodellen oftmals sehr großen Modelldateien, bei denen eine dokumententenbasierte Verarbeitung sehr leistungsstarke Computer erfordern würde, um

- Auswertungen
- Angereichertes Stadtmodell
- Rückgeführte (aufbereitete) Simulationsergebnisse
- Rohdaten Simulationsoutput (Zahlenreihen etc.)

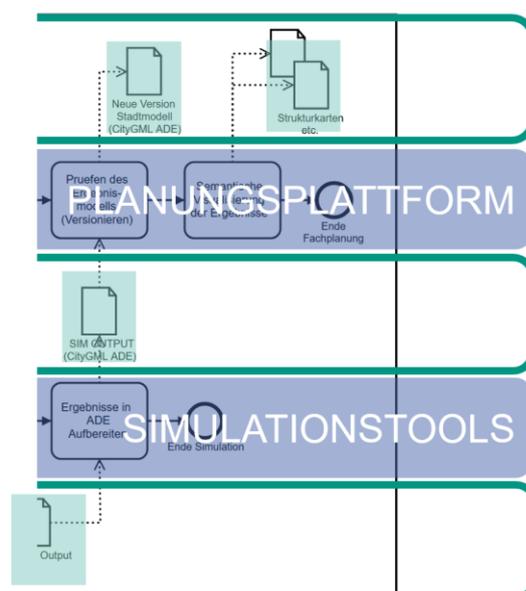


Abbildung 3 Modellbasierter Datenaustausch von der Stadtplanung zum Simulationswerkzeug

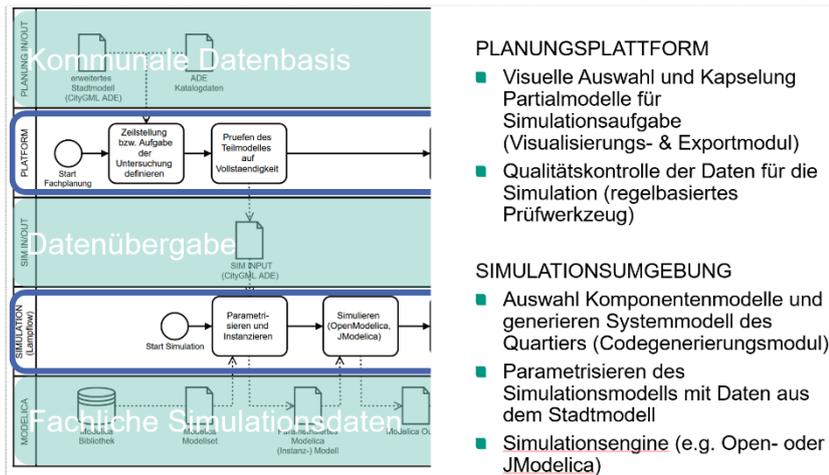


Abbildung 4: Hauptfunktionen der Werkzeugkette modellbasierte Planungsdaten als Simulationsinput

performant damit arbeiten zu können, unterliegen allen Modelloperationen im Auswahl- und Exportwerkzeug ein Modellverwaltungsmodul. In diesem wird beim initialen Laden eines Stadtmodells die Modelldatei in eine native XML-Datenbank eingelesen. Durch das Implementieren einer Schnittstelle zu dem Abfragesprachstandard XQuery ermöglicht die Datenbank neben erheblichen generellen Performancesteigerungen alle Modelloperationen in einer einheitlichen normierten Weise zu verfassen. So werden beispielsweise die in der Visualisierungskomponente durch den Anwender spezifizierten Teilmodelle skriptbasiert in der Datenbank zusammengestellt und in ein Dokument exportiert.

Bevor die zusammengestellten Modelldaten als Grundlage der Parametrisierung entsprechender Modelica-Komponentenmodelle im Stapelverarbeitungsprozess des Simulationswerkzeugs dienen können, ist eine Prüfung ihrer Vollständigkeit erforderlich. Die entwickelte ADE sieht als mögliche Eingangsdaten in die Simulation vier verschiedene Arten von Gebäudeinformationen im Stadtmodell vor, zu denen jeweils im Schema entsprechende Abbildungskonzepte definiert sind.

- PLANUNGSPLATTFORM**
- Visuelle Auswahl und Kapselung Partialmodelle für Simulationsaufgabe (Visualisierungs- & Exportmodul)
 - Qualitätskontrolle der Daten für die Simulation (regelbasiertes Prüfwerkzeug)
- SIMULATIONSUMGEBUNG**
- Auswahl Komponentenmodelle und generieren Systemmodell des Quartiers (Codegenerierungsmodul)
 - Parametrisieren des Simulationsmodells mit Daten aus dem Stadtmodell
 - Simulationsengine (e.g. Open- oder JModelica)

- Typologie-basierte Bedarfsdaten
- Gebäudespezifische Bedarfsdaten
- Typologie-basierte Verbrauchsdaten
- Gebäudespezifische Verbrauchsdaten

Damit ein Partialmodell für eine Quartierssimulation vollständig alle benötigten Informationen enthält, müssen zu den zu simulierenden Gebäudedatensätzen jeweils mindestens zu einem der möglichen vier Stränge die energetischen Basisdaten vorliegen. Hier setzt eine weitere Werkzeugentwicklung im Rahmen des Forschungsprojekts mit einem regelbasierten Prüf- und Analysehilfsmittel für den Stadtmodellstandard CityGML an. Dieses kann der Benutzer in der Desktop-Softwareanwendung als Modul einschalten um die Modellqualität der zu exportierenden Partialmodelle zu prüfen. Soll beispielsweise für ein Gebäude im Quartiersmodell anhand weniger typologischer Parameter, wie die Baualtersklasse, Nutzung, Bauweise usw. zusammen mit den sich aus Geometrie und Lage ergebenden Eigenschaften simuliert werden, so sind die Typologie-bezogenen (ggf. mit weiteren Bauwerken geteilten) Eigenschaften an einem sogenannten Archetyp Element zu Beschreiben. Auf das Gebäudeobjekt selbst wird mit einer erforderlichen Referenz im Archetypobjekt mit den gemeinsamen

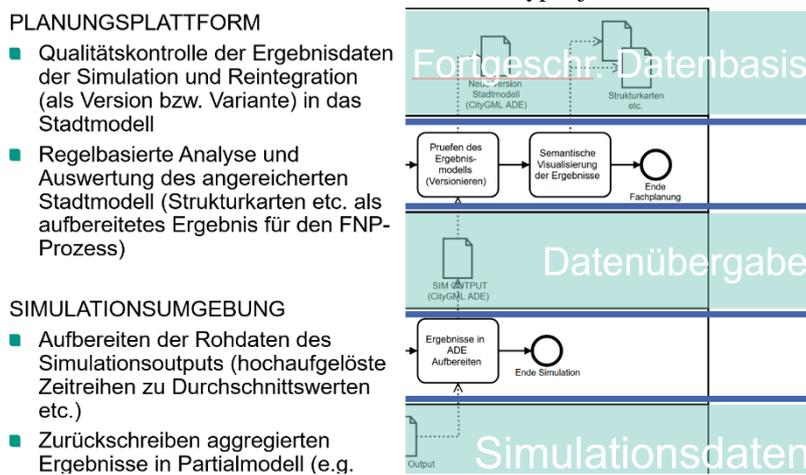


Abbildung 5: Hauptfunktionen der Werkzeugkette zurückgeführte Simulationsergebnisse zur Planung

- PLANUNGSPLATTFORM**
- Qualitätskontrolle der Ergebnisdaten der Simulation und Reintegration (als Version bzw. Variante) in das Stadtmodell
 - Regelbasierte Analyse und Auswertung des angereicherten Stadtmodell (Strukturkarten etc. als aufbereitetes Ergebnis für den FNP-Prozess)
- SIMULATIONSUMGEBUNG**
- Aufbereiten der Rohdaten des Simulationsoutputs (hochaufgelöste Zeitreihen zu Durchschnittswerten etc.)
 - Zurückschreiben aggregierten Ergebnisse in Partialmodell (e.g.

simulationsrelevanten Parametern verwiesen. Dieser Prüffall ist im Rahmen des Prüf- und Analysewerkzeuges in einem Regelsatz aus eigenständigen Regeln hinterlegt, die dem Anwender in der Ansicht einer Regelbibliothek mit den für weitere Prüfungen erarbeiteten Regelsätzen präsentiert werden. Die Regelsätze sind dabei nach einem gleichen Muster aufgebaut: erst wird geprüft ob alle von der der Regel betroffenen Modellelemente existieren, dann werden gemäß der Prüffragestellung die entsprechenden Wertausprägungen und ggf. gesetzten Bedingungen überprüft. Da die einzelnen Regeln, wie beispielsweise zur Überprüfung eines bestimmten Parameters an einem Gebäude jeweils nur im Regelsatz referenziert sind, lassen sie sich in beliebigen Regelsätzen wiederverwenden, die dem Benutzer jeweils zweckgebunden bezeichnet zur Verfügung stehen.

Das gemäß dem intendierten Simulationszweck auf Vollständigkeit geprüfte Partialmodell kann von seitens der Stadtplanung qualitätsgesichert an das Simulationswerkzeug übergeben werden. Hier werden die benötigten Informationen ausgelesen und zur Parametrisierung der Simulationsmodelle verwendet (vgl. Abbildung 4). Nachdem gemäß der vorhandenen Art an Basiswerten zu den Gebäudedatensätzen im Partialmodell ein entsprechender energetischer Performancewert errechnet ist, werden alle Simulationsergebnisse zurück in das Partialmodell an die entsprechenden Gebäudeobjekte geschrieben. Dadurch werden alle der Simulation zugrundeliegenden Eingangparameter in transparenter Weise zusammen mit den Ergebnissen nachweislich gespeichert. Dieses mit Ergebnissen angereicherte Partialmodell wird an die Planungsseite zurückgespielt, wo ein Importwerkzeug für eine konsistente Überführung des Partialmodells in das ursprüngliche Stadtmodell gewährleistet (vgl. Abbildung). Dabei können die Anwender neben der obligatorischen Prüfung der Schemakonformität weitere Inhaltsprüfungen mit dem Prüf- und Analysewerkzeug auf das Partial- sowie auch das angereicherte Stadtmodell ausführen. An letzterem knüpft dabei eine weitere Art von Regeln des Werkzeuges an, mit dem verschiedene Analysen zur lokalen Situation auf das durch Einbringung der Simulationsergebnisse weiter verfeinerte Stadtmodell vollzogen werden. Im Rahmen des Forschungsprojektes sind dies beispielsweise energetische Fragestellungen von zu prognostizierten Energiebedarfen im Quartier, nachdem alternative Entwicklungsszenarien mit unterschiedlichen Annahmen zu Sanierungen im Stadtgebiet simuliert worden sind.

ZUSAMMENFASSUNG

Neben dem Verwalten des Stadtmodells ermöglichen die es Werkzeuge der Desktop-Softwareanwendung Anwender in der Stadtplanung durch Einbinden von Modelica-basierten Simulationswerkzeugen, welche ebenfalls die ADE-basierte Schnittstelle implementieren, zu unterstützen. Somit können die Stadtplaner ihren Kenntnisstand zur lokalen Situation, ggf. zunächst aufgrund schlechter Datenverfügbarkeit ausgehend allein von Typologie-basierten Daten iterativ durch weitere Hinzunahme von gemessenen Verbrauchsdaten bzw. spezifischen Bedarfsdaten, wie beispielsweise im Rahmen der Energiepässe erhoben, verfeinern und in einem Stadtmodell (mit ebenfalls iterativ durch optimierte Erfassungsmethoden, wie Laserscanning usw., verbesserten 3D-Daten) zusammenführen. Im Forschungsprojekt kann nur ein kleiner Ausschnitt der Möglichkeiten einer standardisierten, durchgängigen Datenbasis und damit ermöglichter Planungshilfen für die Stadtplanung gezeigt werden. Erst mit der weiteren Etablierung eines einheitlichen Integrationsmodells als zentrale transparente Abbildungsbasis des Planungsgegenstands, kann das volle Potential, gleichsam des Koordinationsmodellansatzes einer Building Information Modeling Methode auf Gebäudeebene, sich entfalten. Durch Mitwirkung der Projektpartner in der entsprechenden Gremienarbeit sowie ihrer Teilnahme in dem eingangs beschriebenen IBPSA Rahmenprojekt werden die Ergebnisse des Forschungsprojekts in die Standardisierung und Fachdiskussion mit eingebracht.

DANKSAGUNG

Das dem Beitrag unterliegende Forschungsprojekt wird durch das Bundeswirtschaftsministerium aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages gefördert.

LITERATUR

- [1] <http://iea-annex60.org/>, Zugriff am 21.08.2018
- [2] <https://www.modelica.org>, Zugriff am 02.09.2019
- [3] <http://www.iea-annex60.org/releases/modelica/1.0.0/help/Annex60.html>, Zugriff am 12.07.2019
- [4] Wetter, M., Treeck, C., Helsen, L., Maccarini, A., Saelens, D., Robinson, D., & Schweiger, G. (2019). IBPSA Project 1: BIM/GIS and Modelica framework for building and community energy system design and operation – ongoing developments, lessons learned and challenges. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 323, 12114. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012114> (cf. <https://ibpsa.github.io/project1/>)
- [5] Brüggemann, T. et. al. (2020). 3D-Stadtmodellierung: CityGML. In A. Borrmann, M. König, C. Koch, & J. Beetz (Hrsg.), *Building Information Modeling: technologische Grundlagen und industrielle Praxis* (2. Auflage). Springer Vieweg.
- [6] <https://www.sig3d.org/index.php/de/standardisation.html>, Zugriff am 04.03.2019
- [7] <https://inspire.ec.europa.eu/>, Zugriff am 13.09.2019
- [8] <http://www.geoportal.de/DE/GDI-DE/Organisation/organisation.html>, Zugriff am 16.11.2019
- [9] <https://www.opengeospatial.org/taxonomy/term/492>, Zugriff am 16.11.2019
- [10] Brink, Linda van de et.al (2013); UML-Based Approach to Developing a CityGML Application Domain Extension. In: *Transactions in GIS; Volume 17, Issue 6, wiley*. <https://doi.org/10.1111/tgis.12026>
- [11] <http://www.tabula.ge/en/topic/eu>, Zugriff am 17.10.2019
- [12] Ebertshäuser, S. et. al. (2018): Unterstützung kommunalplanerischer Prozesse mit CityGML-basierter Anbindung Modelica-getriebener Quartierssimulationen; BauSIM 2018 - Tagungsband der 7. Deutsch-Österreichischen IBPSA Konferenz, Karlsruhe, Germany.
- [13] Wetter, M., Zuo, W., Nouidui, T. S., & Pang, X. (2014). Modelica Buildings library. *Journal of Building Performance Simulation*, 7(4), 253–270. <https://doi.org/10.1080/19401493.2013.765506>

INVESTIGATION OF WIND FLOW PATTERNS IN DENSE URBAN ENVIRONMENT OF AN EQUATORIAL TROPICAL CITY: A CASE STUDY IN SINGAPORE

P.Pawar¹, D. Zhang², X. Wu², and W. Lang¹

¹Institute of Energy Efficient and Sustainable Design and Building, TUM Department of Civil, Geo and Environmental Engineering, Munich, Germany

²Department of Architecture, Tsinghua University, Beijing, China

ABSTRACT

Wind Velocity Contours (WVC) and Wind Pressure Coefficient (WPC) were investigated to establish the opportunities for incorporating natural ventilation in early design stages of tall buildings in the Tropics. *Cham-Phoenix* software was used to carry out computational fluid dynamic investigations in the central business district of Singapore. The results showed that the average wind speed is between 5 and 6 m/sec. It was also concluded, that between the height of 150 to 250 m in a dense urban environment, the WVC and WPC on the building's surface are sufficient to create a wind tunnel effect through the year to allow for cross and stack ventilation as well as vertical wind catchers.

INTRODUCTION

A humid and warm climate is a characteristic of the tropical regions. It is, therefore, a common practice to use air-conditioning systems to achieve indoor thermal comfort. The expectations of ideal indoor comfort conditions range from 22.5°C-25.5°C for ambient indoor air temperatures and relative humidity of up to 70% (BCA, 1996) (ASHRAE Standard 55 1992). However, due to the prevailing climatic conditions of the region, outdoor temperatures are on average 7°C to 10°C higher, with a relative humidity of up to 90% throughout the year (Meteoblue AG 2020). It has an immediate effect on the indoor conditions of buildings, leading to a need for mechanical ventilation for cooling and dehumidification all year round.

With the change in the lifestyle as well as the globalization of work practices, the energy consumption and associated costs for the operations of buildings are high. A significant proportion (up to 60%) of operational energy in tropical buildings is dedicated to maintaining indoor thermal comfort conditions in both commercial and residential buildings (Qi 2006). Although more energy-efficient Air Conditioning and Mechanical Ventilation (ACMV) systems are being made available, the process of mechanical cooling remains largely energy-intensive. Beyond the energy consumptions, related CO₂ emissions and associated costs, air-conditioning (AC) systems emit a considerable amount of heat into the building's immediate surrounding, thereby adding to the causes of Urban Heat Island (UHI) effects

(Oswald 2016). The largest contributor of heat emissions (89%-96%) globally is heat emitted from the buildings as suggested in the global-scale urban consumption of energy model (Lindberg et al., 2011).

As has been highlighted by the author of the book "*Reduce A/C (...)*" (Oswald 2016), in the regions of the subtropical and tropical Asia, excessive deployment of AC systems has given rise to serious problems related to the Urban Heat Island (UHI) due to expulsion of the waste heat. Yet, very few buildings actually address the issues. The book indicates the importance of application of natural ventilation to reduce the energy consumption to increase thermal comfort of the occupants in high-rise residential buildings of the region.

Natural ventilation is an essential passive strategy that has been traditionally implemented in a hot and humid climate. The modern-day use of natural ventilation has advantages beyond the reduction of energy consumption and greenhouse gas emissions. It has the potential to increase the quality of both indoor and outdoor thermal comfort conditions (Aflaki et al., 2015). The use of natural ventilation in office buildings has decisively proven to reduce the occurrence of the sick building syndrome (Fisk 2002). A study by (Brager et al., 2009), suggests up to 18% savings in health-related costs of occupants in naturally ventilated buildings in comparison with buildings that are mechanically ventilated.

Finally, to address the focus of the building typology for the study, it is important to look at the energy consumption statistics of the building sector in the Tropics. The commercial building sector, as seen from the study conducted by (Qi 2006), consumes about 12% more total energy as compared to the residential sector in Singapore. It is because most of the commercial buildings that average at the height of 150-200m, in the dense urban setting of tropical megacities are designed as sealed glass boxes, which are subjected to high solar gains and fail to use outdoor conditions to their benefit as illustrated in Figure 1. Beyond the high solar impact on the glass facades, the UHI causes higher outdoor temperatures that in turn adds to the indoor comfort conditions considerably.



Figure 1: Central Business Districts of four tropical cities: Singapore, Kuala Lumpur, Bangkok and Jakarta. Source: Internet Images

The three parameters responsible for effective implementation of natural ventilation within a building are ambient indoor air temperature, relative humidity and air velocity (Szokolay 2012). Passive design strategies for building envelopes have the capability to modulate the indoor air temperatures and the air velocities. Building heights have a significant role in influencing the air velocities. It is suggested by (Hindrichs et al., 2007), that the heights above water bodies or flat grounds have a proportionate effect (increases) on the wind velocities. However, over an urban environment, the speeds decrease as the boundary layers begin at higher heights (Hindrichs et al., 2007). Hu, X-M defines boundary layers as “the lowest part of the troposphere that is directly influenced by the presence of the earth’s surface, and responds to surface forcing within a timescale of about an hour or less” (Hu, 2015).

When designing buildings for wind-driven ventilation opportunities, the most apparent investigations must be first concerned with wind scenarios at the local neighbourhood level (macro-scale). Subsequently, the wind flow patterns around the building must be understood, where the building’s immediate surroundings (meso-scale) may act as obstacles to hinder the effective intake or use of the available wind velocity and pressure. Finally, conditions must be analyzed at the building level, where its orientation, shape, aspect ratio, façade designs, aperture sizes, numbers and height would affect the ventilation strategies (micro-level) (Oswald 2016). The study is an example to conduct a preliminary investigation at the macro and meso-level.

To undertake any building design for natural ventilation purpose, a preliminary investigation to quantify the possible wind scenarios in a specific setting is essential. Two important factors for wind scenario assessments are the measurements associated with wind speeds that surround the building and pressure exerted on the building facade. The parameters of these measurements are calculated as wind velocity contours (WVC) and the wind pressure coefficients (WPC) respectively. WVC and WPC are vital parameters when designing high-rise buildings

for wind-driven ventilation systems. WVC are the contour lines that illustrate the speed and the direction of the wind around the building while taking into account the building geometry and the obstacles that may alter the wind flow and speed around the buildings. WPC is a dimensionless value which denotes the wind-induced pressure at a specific point in a building, relative to the freestream wind pressure (Charisi et al., 2019).

Therefore, this paper aims to investigate the wind scenario parameters of WVC and WPC for effective application of natural ventilation strategies for high-rise commercial buildings set in a dense urban environment in an equatorial tropical city of Singapore.

METHODOLOGY

The study focuses on quantifying the WVC and the WPC on an example set of buildings in the central business district (CBD) of Singapore. To do the same, Computer Fluid Dynamic (CFD) simulation technique was employed. The details of the modelling and simulations are stated in the following sections.

In order to ensure effective wind-driven cross ventilation a maximum differential between the windward and leeward values of WVC and WPC is ideal. However, the intake of the air for ventilation purposes can then be regulated through building façade design to eliminate drafts for thermal comfort conditions, yet ensuring that the desired air-speed is achieved for effective air exchange (circulation) within a space.

Modelling

The details of the methodology are presented in Figure 2.

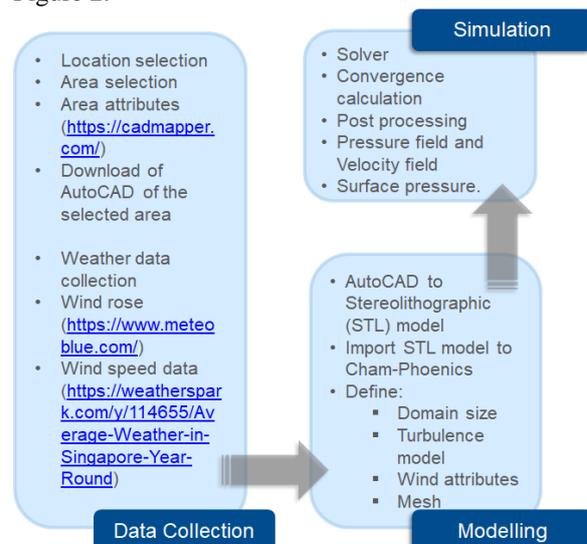


Figure 2: Methodology for Data collection, Modeling and Simulation

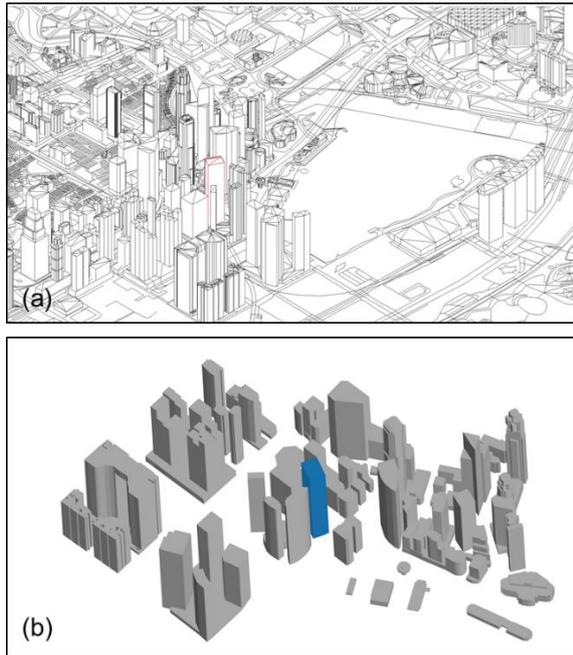


Figure 3: (a) AutoCAD Model (b) STL Model

Simulation

Simulations were carried out for North-North West (NNW) and South-South East (SSE) wind scenarios, as these are the two prevailing wind directions for Singapore as seen from the wind rose diagram in Figure 5. For the simplicity of simulation, a constant wind velocity of 4.7 m/s and 2.3 m/s was used for all levels in two wind scenarios.

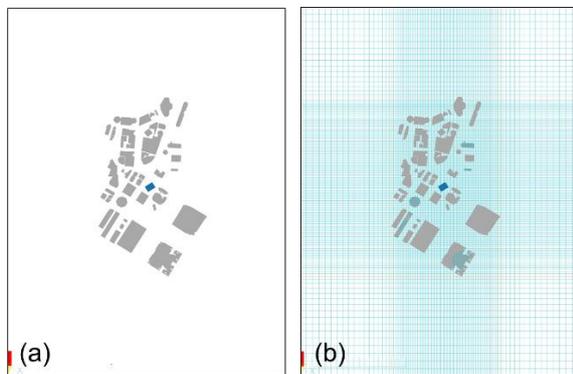


Figure 4: (a) Computational Model (b) Meshing Model

Table 1: Boundary Conditions for CFD Simulation

PARAMETER	VALUES
Wind Direction and Speed	N, 4.7m/s & S, 2.3m/s
Power Law Index	0.28
Area Size (m)	702 x 1168 x 283
Domain Size (m)	1800 x 2400 x 420
Turbulence Models	kε model
Reference Pressure (Pa)	101325
Ambient Pressure	0
Number of Iterations	5000
Density (constant) (kg/m ³)	1.189
Viscosity (constant)	1.54E-05

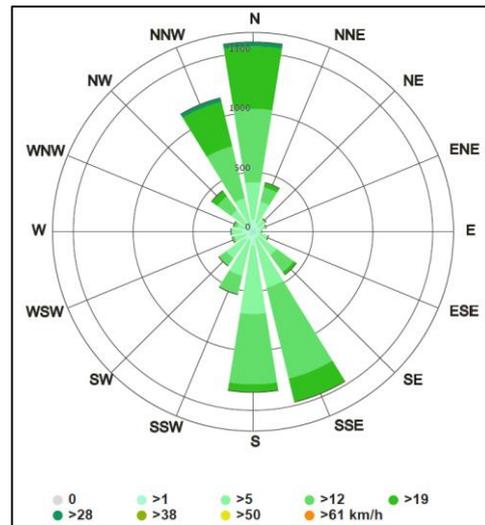


Figure 5: Wind Rose diagram for Singapore (Meteoblue AG 2020)

For WVC, simulations were carried out from 150 m to 250 m at an interval of 25 m. To establish the WPC on each face of the building, dynamic-wind pressure was computed at 75, 175 and 225m from the ground level. The values for WPC were calculated using Equation (1).

$$C_p = \frac{(p - p_\infty)}{(0.5 * \rho * U_\infty^2)} \tag{1}$$

Where, C_p is the WPC, p is the pressure at the point of interest, p_∞ is the pressure in the freestream, ρ is the freestream air density, and U_∞ is the freestream wind velocity at the building height (Costola et al., 2009) (Charisi et al., 2019).

Table 2 details the values of $p - p_\infty$ used for calculations at different levels for the North Wind Scenario (NWS) and South Wind Scenario (SWS). These values were obtained from the simulations.

Table 2: $p - p_\infty$ values used for calculating WPC

FACADE	HEIGHT	$p - p_\infty$ (NWS)	$p - p_\infty$ (SWS)
South	75 m	-2.5	4.5
	175 m	-4.9	3.3
	225 m	-4.2	1.8
North	75 m	3.3	-2.1
	175 m	3.7	-3.3
	225 m	2.4	-4.4
West	75 m	-1.6	-2.9
	175 m	-3.4	-0.8
	225 m	-2.2	-0.8
East	75 m	6.9	-1.8
	175 m	11.3	-2.4
	225 m	4.7	-2.9

Table 3 details the values used for ρ and U_∞ in NWS and SWS.

Table 3: Values of ρ and U_∞ used to calculate WPC

ρ (kg/m ³)	U_∞ NWS (m/s)	U_∞ SWS (m/s)
1.1521	4.7	2.3

RESULTS

Results for three topics are presented. Firstly, WVC and pressures at the domain and secondly, at building level. Finally, the third section describes results computed for WPC at building level. The domain level is the neighborhood level of the selected building (macro level). The domain size for the study is listed in Table 1. More details are discussed in the following sections.

Wind Velocity Contours at Domain Level

The results of simulations at the domain level consists of external surface pressures exerted on the building faces. Figure 6 shows, that the positive pressure on the windward side ranges between 1 and 5 Pa in each of the two wind simulated wind scenarios. Similarly, the negative pressure on the leeward side range between -5 and 0 Pa.

Figure 7 illustrates the results for the pressure distribution and the WVC for the NWS, at the selected site area throughout the domain from the height of 150 m from the ground level to 250 m. It was noted, that for the NWS within the domain the maximum pressure and wind velocity on the windward side is 10 Pa and 8m/s respectively. On the leeward side, the pressure and wind velocity values are -7 Pa and 3 m/s, respectively. On average, the domain experiences an

average pressure of 5 Pa on the windward side and -3.75 Pa on the leeward side. The average wind velocity within the domain on the windward side was observed at 5.5 m/s and 2.5 m/s on the leeward side.

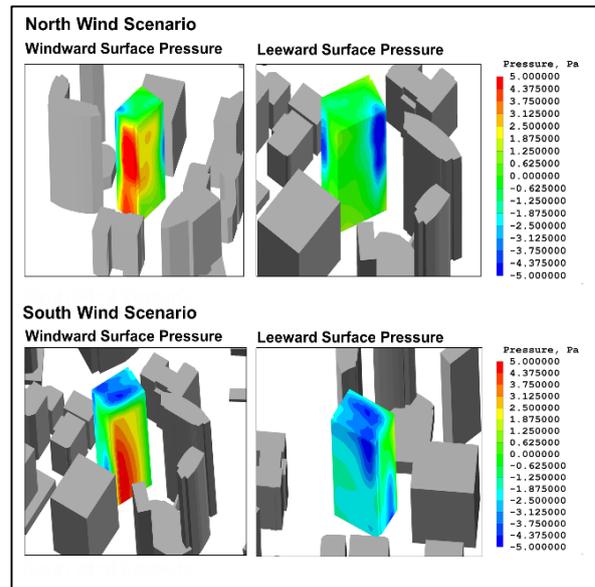


Figure 6: Domain Result- External surface pressure on building faces

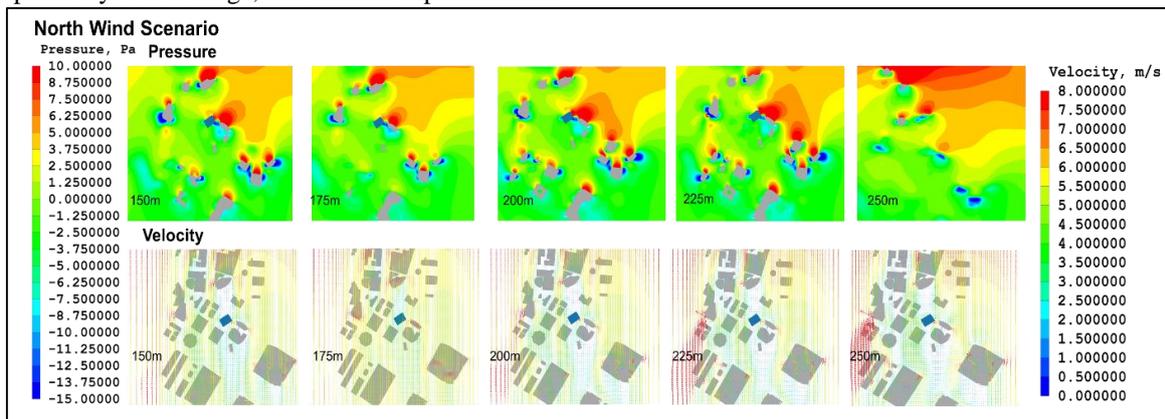


Figure 7: Domain Result- North Wind Scenario simulation result for pressure and WVC from 150 – 250 m

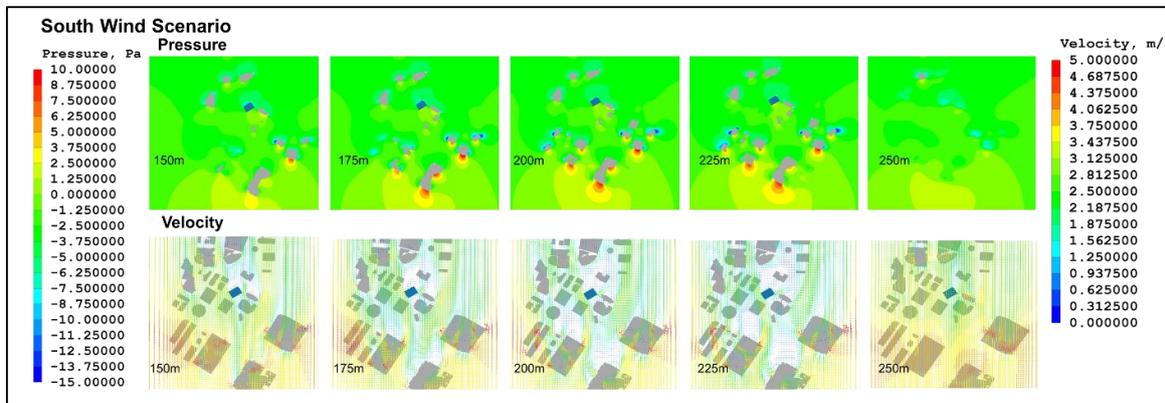


Figure 8: Domain Result- South Wind Scenario simulation result for pressure and WVC from 150 – 250 m

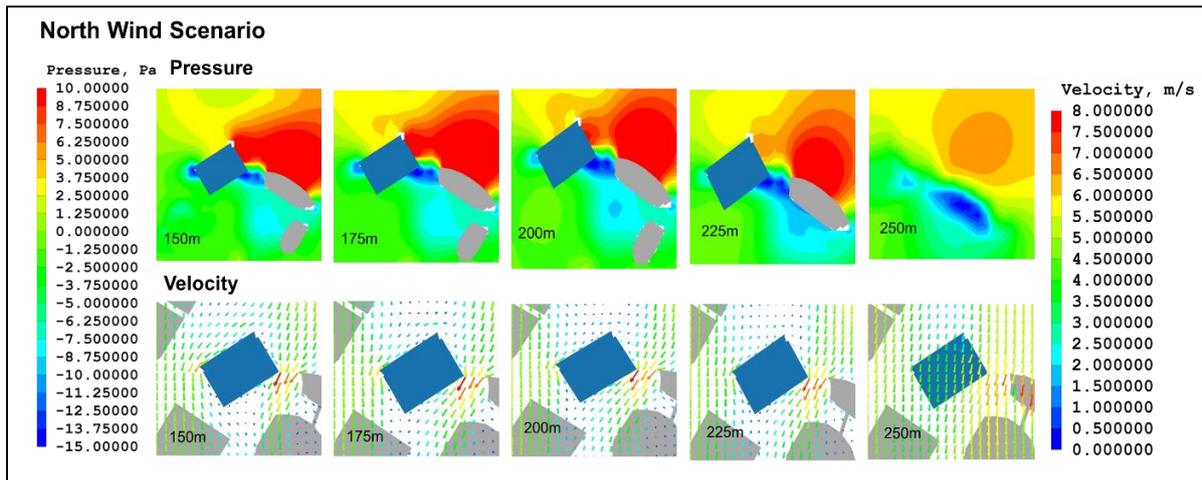


Figure 9: Building Result- North Wind Scenario simulation result for pressure and WPC from 150 – 250 m

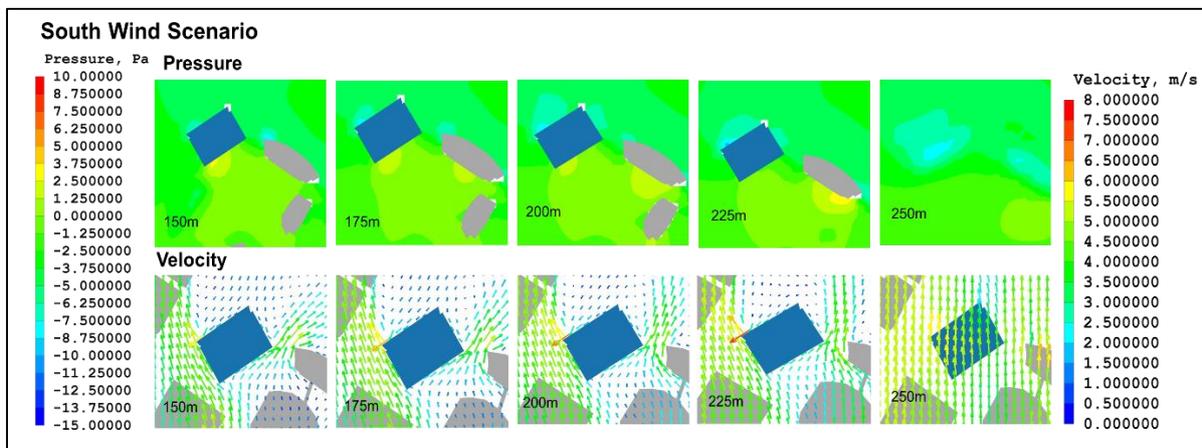


Figure 10: Building Result- South Wind Scenario simulation result for pressure and WPC from 150 – 250 m

Figure 8 shows similar results for the pressure distribution and the WVC for the SWS. It was noted, that for the SWS within the domain, the maximum pressure and wind velocity on the windward side is 3.75 Pa and 5 m/s respectively. On the leeward side, the pressure and wind velocity values are -3.75 Pa and 1.87m/s, respectively. On average, the domain experiences an average pressure of 2.5 Pa on the windward side and -2.5 Pa on the leeward side. The average wind velocity within the domain on the windward side is observed at 3.45 m/s and 2.10 m/s on the leeward side.

Wind Velocity Contours at Building Level

Figure 9 shows the results of the NWS simulation at the building level. The results are for 150 to 250 m above the ground. It was concluded from the result that the range of surface pressure on the windward side of the building ranged between 2.5 to 6 Pa at various heights. Similarly, the results for the leeward side suggest the range of negative surface pressure varies between -5 to -1 Pa. In terms of wind velocity around

the building, the range was observed between 4.5 to 6 m/s on the windward side. Whereas, on the leeward side, the range of wind velocity was noted between 1.5 to 2.5 m/s.

Figure 10 shows the results of the SWS simulation at the building level. The results are for the same heights as specified in NWS. The range of surface pressure in SWS, on the windward side of the building, lies between 1.25 to 2.5 Pa at various heights. Similarly, the results for the leeward side suggest the range of negative surface pressure ranges between -6.25 to -3 Pa. In terms of wind velocity around the building, the range was observed between 2 to 3 m/s on the windward side. Whereas, on the leeward side, the range of wind velocity was noted between 0.5 to 1.5 m/s. Overall, in the SWS wind velocities are significantly lower on the windward and leeward side than in the NWS. This is due to the low wind speeds from the SSE direction as seen in Figure 5.

Wind Pressure Coefficients at Building Level

The simulation at building level also provided values for $p - p_\infty$ stated in column 3 and 4 of Table 2. These were then used to calculate the values of WPC (denoted as C_p) indicated in column 3 and 4 of Table 4 using Equation 1. Figure 11 and 12 show the WPC of various facades at 75, 175 and 225 m from the ground for the two simulated wind scenarios. The tabulations of the values of the coefficients are stated in Table 4. As seen in Figure 11, in the NWS, the WPC is positive on the windward side (North and East Façade) while it stays negative on the leeward side (South and West Façade).

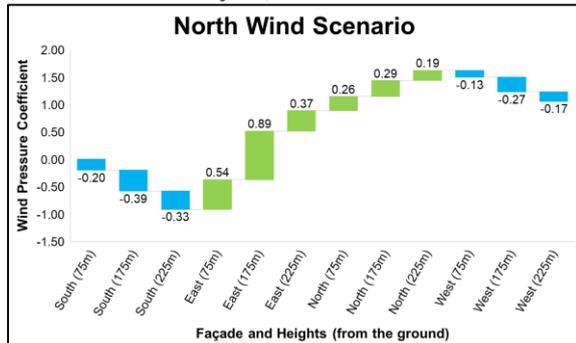


Figure 11: WPC (C_p) for NWS

However, for the SWS, the values of the WPC remain negative on three sides of the building (East, North and West) as seen in Figure 12.

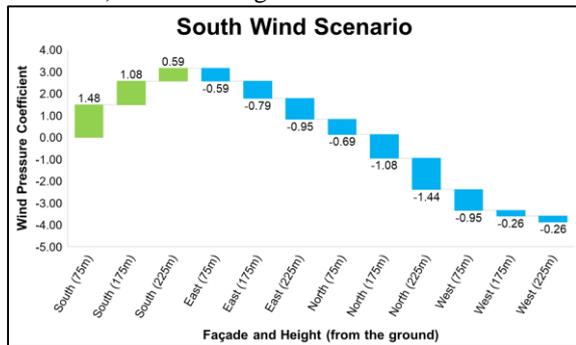


Figure 12: WPC (C_p) for SWS

Table 4: C_p at various heights on different facades

FACADE	HEIGHT	C_p (NWS)	C_p (SWS)
South	75 m	-0.196	1.477
	175 m	-0.385	1.083
	225 m	-0.330	0.591
North	75 m	0.259	-0.689
	175 m	0.291	-1.083
	225 m	0.189	-1.444
West	75 m	-0.126	-0.952
	175 m	-0.267	-0.263
	225 m	-0.173	-0.263
East	75 m	0.542	-0.591
	175 m	0.888	-0.788
	225 m	0.369	-0.952

Although the simulations are carried out from level 150 to 250 m at an interval of 25 m, there is no major change in the WVC. It may be due to the fact that

DISCUSSION

One of the ways to understand the wind scenarios prevailing within the immediate surrounding of a building is by employing CFD simulation techniques. The results of CFD simulation lends a vivid insight on not only the WVC available at various heights along the Z-axis, but also allow a clear understanding of the wind flow pattern along the building and its immediate surroundings as seen in Figures 7-10. Beyond the visual results, the simulation also provides numerical values important for computing various other parameters, for example, for the present study, the calculation of WPC values.

Comparison of the Wind Scenario- Domain Level

As suggested in Figure 5, the predominant annual wind directions in Singapore are NNW and SSE. From the simulated wind scenario cases, it was inferred that to maximize the potential of natural ventilation, the intake façade of a building should be oriented in the North-South direction. The wind velocity and pressure differential in the NSW have the potential to effectively carry out wind-driven cross ventilation in buildings with narrow floor plates. The WVC and surface pressure for the SWS, on the other hand, are not as effective for wind-driven natural ventilation, but the orientation can be used for fresh air intake for hybrid ventilation systems.

Comparison of Wind Scenario-Building Level

As suggested in the previous section of the discussion, it was inferred that the NWS works the best for the case study under investigation at the domain level. From the results, it can also be inferred that the same is true at the building level.

Two other observations were noticed at the building level investigation. The pressure and wind velocity at the corner of the buildings on the leeward side were much higher than on the windward side. This is caused by the airflow being incapable of negotiating sharp corners (Gupta et al., 1993), resulting in the separation of flow from the boundary surface (Davenport 1960).

The phenomenon is more prevalent in the NWS. Secondly, it was also observed, as seen in Figure 9, that a wind tunnel effect is created between two adjacent buildings with similar heights. The distance between the two buildings (20 m) and their similar heights (245 m) created a significant pressure differential causing the wind to pass through the two buildings with higher velocities of 8 m/s as compared to the 5.5 – 6 m/s on the free side. While orienting a building in a wind shadow area of two closely spaced buildings in a dense urban environment, the phenomenon can be used to an advantage.

Although the simulations are carried out from level 150 to 250 m at an interval of 25 m, there is no major change in the WVC. It may be due to the fact that

above the built environment wind velocity decreases as the boundary layer begins at a greater height (Oswald 2016).

Comparison of Wind Pressure Coefficients-Building Level

When conducting investigations for wind-driven natural ventilation, WPC on different facades of the building play an important role. For the study of building physics and engineering, WPC is used to calculate wind loads of the building faces as well as for calculation of wind-induced infiltration (Charisi et al., 2019) (Liddament et al., 1996). Microclimates for building energy simulation can be introduced through WPC subsequently enabling a more accurate prediction of wind induced air-infiltration (NV) (Charisi et al., 2019), (Charisi et al., 2019) (Charisi et al., 2017). For high-rise buildings the WPC (C_p) values vary significantly along the height (Z-axis), hence it is appropriate to use localized C_p values Charisi et al., 2019).

Like for the wind scenarios at the domain and building level, the NWS was proven to have a better performance with the computed C_p values than the SWS. From the values of the NWS, it could be inferred that the windward façade had positive C_p values, and the leeward side had negative C_p values which evidently support unhindered cross ventilation through a built structure. However, the values of the SWS suggest negative C_p values on three sides of the building, which is not suitable for wind-driven natural ventilation unless the openable apertures are only placed on the North and South façade.

Beyond the application of the current methodology as discussed above, a simulation based study provides valuable data (WPC and WVC) which can be used for advance design stages. In a simulation study, real life situations are modeled up to a near accuracy to produce results that provide an accurate overview of the space performance that is being investigated. When the modeling and input data is accurate the simulation results can be trusted by designers to make informed decisions. Furthermore, computer based simulation studies save designers and developers a lot of capital investment for carrying out long and tedious processes such as wind tunnel testing. It is therefore highly recommendable to carry out simulation based CFD investigations at the early design stages of a building to ensure enough NV opportunities can result into a high performance, modern day building.

CONCLUSION

It is a fact that natural ventilation has physical and physiological advantage for the building and its occupants. The physical (energy related) advantages are now easily quantifiable. However, when it comes to the quantifying the physiological benefits there still remains an ambiguity regarding the results of such studies. This is because physiological benefits are

measured using thermal comfort models. Thermal comfort models quantify the combination of indoor space environment and personal factors which produce thermal environmental conditions which are acceptable to 80% or more of the occupants within a space (ASHRAE, ANSI 1992). The current standard for occupant thermal comfort is based on the heat balance model of the human body. This model predicts that the thermal sensation is exclusively influenced by environmental factors such as temperature, thermal radiation, humidity and air-speed and occupant personal factor such as activity and clothing (Brager et al., 2001).

A recent study (Aynsley 2007) suggested, that, in warm climatic conditions, the elevated air speeds from either natural ventilation or a mechanical fan have the potential to offer a temperature offset of 9°C. Based on this principle, it can be inferred that in a humid climate like that of Singapore, the presence of elevated air velocity aides in evaporative and convective cooling from human skin. (Kwong et al., 2014). When buildings make use of natural ventilation for elevated wind-speed purposes, the process can be beneficial for energy efficiency as well as occupant comfort. For all the reasons stated above, it is highly recommended that more high-rise, commercial buildings in the tropics (which are energy intensive in their daily operations) must incorporate natural ventilation strategies as a passive measure to decrease their operational energy consumption.

Although the study started as finding natural ventilation opportunities for hot and humid climatic conditions, it can be conclusively suggested that every site in question must be evaluated individually. The methodology used in the current study for primary investigation can be universally applied for all similar studies. From the current study, it can be concluded that between the height of 150 to 250 m in a dense urban environment like that of Singapore, the WVC as well as the pressure on the surface of the building is enough to create a wind tunnel effect through the year to allow for cross and stack ventilation. However, the wind velocities at these heights are too large to allow an uncontrolled intake (via operable windows). Therefore, the recommendation from this study would be to test out façade designs which can slow down the air velocity to a recommended speed of 0.25 m/s. In a study conducted in the hot and humid climate of Brazil, the range of acceptable air speed was between 0.5 and 1.5 m/s (Candido et al., 2008). It could also be applicable to a place like Singapore and other equatorial tropical regions.

Furthermore, understanding of WVC is not enough information to design natural ventilation strategies for any building, because WPC play a significant role in ensuring a smooth flow of wind-driven ventilation within a building. There is a significant correlation

between the surface pressure and the adjacent buildings which affects the WVC and WPC. A proper preliminary investigation into both parameters can afford designers an opportunity to design relevant natural ventilation strategies for high-rise office buildings in a dense urban environment like that of a CBD in Singapore.

ACKNOWLEDGEMENT

This study is a part of doctoral research undertaken by the author and is supported by the Institute of Energy Efficient and Sustainable Design and Building, Technical University of Munich. We also would like to acknowledge the insight and guidance provided by Mrs. Patricia Schneider- Marin, Mr. Thomas Boekels and Mr. Rohit Kumar Dubey.

REFERENCE

- Aflaki,A., Mahyuddin,N., Mahmoud,Z.A. and Baharum,M.R. 2015. "A review on natural ventilation applications through building facade components and ventilation openings in tropical climates." *Energy and Buildings* 153--162.
- ASHRAE Standard 55. 1992. "Standard 55-1992. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers, Atlanta.
- Aynsley, R. 2007. "How air movement saves energy in indoor environments." In AIRAH sustainability for tropical and sub-tropical climates conference, 22-28.
- Brager, G. and De Dear, R. 2001. "Climate, comfort, & natural ventilation: a new adaptive comfort standard for ASHRAE standard 55."
- Building Construction Authority (BCA) of Singapore. 1996. "Guidelines for Good Indoor Air Quality in Office Premises." BCA Greenmark. October. Accessed February 26, 2020. https://www.bca.gov.sg/greenmark/others/NEA_Office_IAQ_Guidelines.pdf.
- Cadmapper,LLC.2019.Oct 0. <https://cadmapper.com>.
- Candido, C. and De Dear, R., Lamberts, R. and Bittencourt, L and others. 2008. "Natural ventilation and thermal comfort: air movement acceptability inside naturally ventilated buildings in Brazilian hot humid zone." *Air Conditioning and the Low Carbon Cooling Challenge*, Cumberland Lodge, Windsor, London 27-29.
- Cedar Lake Ventures, Inc. 2019. Oct 19. <https://weatherspark.com/>.
- Charisi, S., Thiis, T.K. and Aurlien, T. 2019. "Full-Scale Measurements of Wind-Pressure Coefficients in Twin Medium-Rise Buildings." *Buildings* 63.
- Charisi,S., Waszczuk,M. and Thiis,T.K., 2019. "Determining building-specific wind pressure coefficients to account for the microclimate in the calculation of air infiltration in buildings." *Advances in Building Energy Research* 1-22.
- Charisi,S., Waszczuk,M. and Thiis,T.K., 2017. "Investigation of the pressure coefficient impact on the air infiltration in buildings with respect to microclimate." *Energy Procedia* 637--642.
- Costola, D., Blocken, B., and Hensen, JLM. 2009. "Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs." *Building and environment* 2027--2036.
- Davenport, A. G. 1960. *Wind loads on structures*.
- Edelman, A., Gelding, A., Kononov, E., McComiskie, R., Penny, A., and Roberts, N., Templeman, S., Trewin, D., Ziembicki, M., Trewin, B., and others 2014. "State of the Tropics 2014 report." James Cook University.
- Fisk,W.J., 2002. "How IEQ affects health, productivity." *ASHRAE journal* LBNL-51381.
- Gupta, A.J., and Moss, P.J., 1993. *Guidelines for design of low-rise buildings subjected to lateral forces*. CRC Press.
- Hindrichs, D.U., and Daniels, K., Berthold, S., Fisch, M. N.,Hammann, R. E., Heusler, W.,Kibe, H., Shah, A., and Yacoub, M.. 2007. *Plusminus 20/40 latitude: sustainable building design in tropical and subtropical regions*. Stuttgart: Edition Axel Menges.
- Kwong, Q.J., Adam, N.M., and Sahari, BB. 2014. "Thermal comfort assessment and potential for energy efficiency enhancement in modern tropical buildings: A review." *Energy and Buildings* 547--557.
- Liddament, M.W. and Agence internationale de l'energie. Air Infiltration. 1996. *A guide to energy efficient ventilation*. London, U.K.: Air Infiltration and Ventilation Centre Coventry.
- Meteoblue AG. 2020. *Tropical Rain Forest*. <https://content.meteoblue.com/en/meteoscool/vegetation/tropical-rain-forest>.
- Oswald, F. 2016. *REDUCE A/C-Reducing the utilisation of air conditioning in high-rise buildings in subtropical and tropical climate regions*. Graz: Technical University of Graz.
- Qi, C. 2006. "Office building energy saving potential in Singapore." NUS Library, Singapore.
- Szokolay, S. 2012. *Introduction to Architectural Science*. Routledge.

VI: Modellierung und Simulation im Lebenszyklus von Gebäuden

DIE BEDEUTUNG VON ANLAGENTECHNIK FÜR DIE ÖKOBILANZ VON NICHTWOHNGEBÄUDEN ERGEBNISSE EINES NEUEN ANLAGENKONFIGURATORS

D. Chuchra^{1,2}, R. di Bari^{1,2}, O. Jorgji^{1,2} und S. Albrecht²

¹Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

²Fraunhofer IBP, Stuttgart, Deutschland

ABSTRACT

Buildings make a significant contribution to global warming, resource consumption and the production of waste. With improved energy standards, the share of the environmental impacts of the life cycle caused by the production and end-of-life of building technology components is increasing. Due to their complexity, building services components account for up to 25 % of a building's total greenhouse gas emissions. In the assessment methods currently used, the distribution and the transfer are often simplified or not reflected in the evaluation procedures. For this reason, a system configurator was developed that can be used flexibly in the planning process and is adapted to the available information. First results show that the share of distribution and transfer systems can amount to up to 80 % of the total greenhouse gas emissions of a cost group and is therefore not negligible, as has been the case so far.

KURZFASSUNG

Gebäude leisten einen erheblichen Beitrag zur globalen Erwärmung, dem Ressourcenverbrauch und der Produktion von Abfällen. Mit verbesserten Energiestandards steigt der Anteil der Herstellung und des Lebensendes gebäudetechnischer Komponenten an den Umweltwirkungen des Lebenszyklus. Aufgrund der Komplexität liegt der Anteil gebäudetechnischer Komponenten an den gesamten Treibhausgasemissionen eines Gebäudes bei bis zu 25 %. In den derzeit angewendeten Bewertungsverfahren werden die Verteilung und Übergabe oft vereinfacht oder nicht abgebildet. Es wurde daher ein Anlagenkonfigurator entwickelt, der flexibel im Planungsprozess eingesetzt werden kann und an die verfügbaren Informationen angepasst ist. Erste Ergebnisse zeigen, dass der Anteil der Verteil- und Übergabesysteme bis zu 80 % an den gesamten Treibhausgasemissionen einer Kostengruppe betragen kann und daher nicht wie bisher vernachlässigbar ist.

EINLEITUNG

Erklärtes Ziel der Bundesregierung Deutschlands ist es, bis 2050 die jährlichen Treibhausgasemissionen um mindestens 80 % im Vergleich mit 1990 zu reduzieren (BMUB 2016). Deutschland folgt damit dem langfristigen europäischen 80 % Ziel, das

im Rahmen der Klimaschutzziele 2030 festgelegt wurde (Europäische Kommission 2018). Damit dieses Ziel erreicht werden kann, müssen alle Bereiche des täglichen Lebens und der Wirtschaft in dieser Hinsicht optimiert werden. Eine besondere Verantwortung trägt dabei der Bausektor, was Abbildung 1 verdeutlicht.

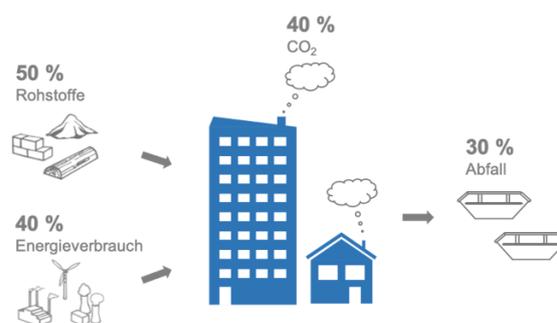


Abbildung 1: Verbrauch von Energie und Ressourcen im Bausektor

Etwa 40 % des europäischen Energieverbrauches entfallen auf den Bausektor, dieser verursacht rund 40 % der weltweiten Treibhausgasemissionen und trägt mit einem Anteil von 30 bis 40 % zum weltweiten Müllaufkommen bei. In Deutschland verursachen Gebäude 35 % des Endenergiebedarfes und etwa 30 % der Treibhausgasemissionen (Umweltbundesamt 2018).

Die Notwendigkeit, den Energieverbrauch und damit die Treibhausgasemissionen von Gebäuden zu senken, ist spätestens mit der Einführung der ersten Wärmeschutzverordnung beziehungsweise mit dem Inkrafttreten des Energieeinspargesetzes im Jahr 1977 durch den Gesetzgeber anerkannt und geregelt worden. Auch über 40 Jahre später werden die Anforderungen an die Gebäude durch die Energieeinsparverordnung regelmäßig verschärft (Bundesgesetzblatt 2013) und dem Stand der Technik angenähert, was zu immer effizienteren Gebäuden führt. Bereits heute können Häuser gebaut werden, die in ihrer Nutzungsphase mehr Energie erzeugen als sie verbrauchen. Wird diese Entwicklung im Kontext der Lebenszyklus-analyse betrachtet, so wird der Anteil der für die Herstellung und das Lebensende benötigten

Energie und Ressourcen am gesamten Lebenszyklus immer größer. Folglich wird es zukünftig immer wichtiger werden, schon zu Beginn der Konzeption die Umweltwirkungen von gebäudetechnischen Anlagen bestimmen, bewerten und vergleichen zu können, um den Anteil des Ressourcenverbrauchs für die Herstellung und das Lebensende zu minimieren.

STAND DES WISSENS

Anlagentechnik ist ein zentraler Bestandteil moderner Gebäude. Gemeinsam mit der Gebäudehülle wird sichergestellt, dass ausreichen Wärme, Warmwasser und Frischluft zur Verfügung steht.

Bessere Standards und höhere Anforderungen an die Gebäude führen zu immer weniger Energieverbrauch während der Nutzungsphase und so werden die Anteile der Herstellung und des Lebensendes am Lebenszyklus immer relevanter. Diese Standards sind bereits so weit entwickelt, dass die Nutzungsphase selbst nur noch wenig Potential für Optimierungen bietet. Größeres Potential liegt dagegen in der Herstellung und des Lebensendes der Komponenten (Passer et al. 2012, Ibn-Mohammed et al. 2013).

Dennoch wird die Anlagentechnik in der Ökobilanzierung von Gebäuden noch immer nicht optimal abgebildet, obwohl diese einen nicht zu vernachlässigenden Teil der Umweltwirkungen ausmacht (Stoffregen et al. 2010, Passer A. 2010, Pohl S. 2014, Weißenberger M. 2016).

Zwar kann über eine detaillierte Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 und 14044 (Europäisches Komitee für Normung, 2006) Anlagentechnik detailliert berechnet werden, dies ist jedoch zeitintensiv und erfordert Expertenwissen im Bereich der Komponenten selbst, der Lebenszyklusanalyse und der Modellierung. Benötigt werden stattdessen Werkzeuge und Datensätze mit denen Architekten und Ingenieure ihre Planungen in frühen Projektphasen eigenständig optimieren können (Gantner, J. 2018).

Für die Gebäudeökobilanzierung im deutschsprachigen Raum stellt die Datenbank ÖKOBAUDAT (BMI 2020) diese Datensätze zu Verfügung. Die öffentlich zugängliche Plattform und Umweltdatenbank umfasst Stand heute etwa 1.200 Datensätze für Baustoffe und -produkte und Informationen rund um die Ökobilanzierung von Gebäuden. Sie wird vom Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) herausgegeben und bis zu zweimal jährlich aktualisiert. Ziel der ÖKOBAUDAT ist es, vereinheitlichte und qualitativ hochwertige Daten entgeltfrei für die Lebenszyklusanalyse von Gebäuden zur Verfügung zu stellen. Die Datensätze der ÖKOBAUDAT finden verbindliche Anwendung im „Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen“ und werden auch international für die Bilanzierung von Gebäuden genutzt. Die ÖKOBAUDAT ist mit den enthaltenen Datensätzen ein maßgeblicher Baustein bei der Berechnung von Umweltwirkungen von Gebäuden, da sie als

Datengrundlage bei der Zertifizierung durch die DGNB Anwendung findet. Obwohl viele Bauprodukte und Komponenten bereits enthalten sind, bestehen gerade im Bereich der Anlagentechnik noch Defizite (Gantner J. 2018). So sind beispielsweise keine Datensätze von Kältemaschinen und Blockheizkraftwerken vorhanden, die jedoch häufig Bestandteile von Nichtwohngebäuden sind.

Einige etablierte Berechnungstools benutzen die ÖKOBAUDAT ebenfalls als primäre Datenquelle. Dazu gehören die im Folgenden aufgeführten Anwendungen.

- Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BMVBS 2010)
- eLCA (BBSR 2015)
- Ökobilanz-Bau (HOINKA GmbH 2019)
- DGNB Navigator (DGNB 2020)
- SBS Building Sustainability (thinkstep AG 2018)
- GENERIS (Fraunhofer IBP 2020)
- OneClick LCA (Binova Ltd 2018)
- CAALA (CAALA GmbH 2018)
- LEGEP (WEKA MEDIA GmbH 2018)

Obwohl die Verwendung einer Datenbank für eine Vielzahl von Anwendungen Vorteile in Form der Verfügbarkeit und Relevanz bietet, so ziehen sich auch die Schwächen und Defizite durch sämtliche Anwendungen. Im Vergleich zu Bauteilen der Gebäudehülle ist die Datenbasis für gebäudetechnische Anlagen in weitaus geringerem Maß vorhanden. Von den rund 1.200 Einträgen gehören nur knapp über 100 zu den Kostengruppen 410, 420 und 430 nach DIN 276 (Deutsches Institut für Normung 2018). Es fehlen außerdem wesentliche Komponenten der Kühlung und größere Wärmeerzeuger, um auch Nichtwohngebäude umfänglich abbilden zu können.

Abgrenzung zum Stand des Wissens

Um die bestehenden Methoden zu bewerten wurde eine Matrix mit verschiedenen Kriterien erstellt und diese auf Übereinstimmung mit der jeweiligen Methode überprüft. Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse als Übersicht.

Tabelle 1: Analyse der Methoden zur Ökobilanzierung von Gebäuden

Ökobilanz nach ISO 14040	+	/	-	+	-	+
Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen	/	-	-	-	+	+
Vereinfachtes Verfahren nach BNB	-	/	-	-	+	+
Webanwendung eLCA	/	/	-	-	+	+
Webanwendung Ökobilanz-Bau	/	/	-	-	+	+
DGNB Navigator	/	/	-	-	+	+
SBS Building Sustainability	/	/	+	-	+	+
OneClick LCA	/	/	-	/	/	+
Sonstige Forschungsansätze	+	/	/	+	-	-

+ Übereinstimmung mit dem Kriterium
 / Eingeschränkte Übereinstimmung mit dem Kriterium
 - Keine Übereinstimmung mit dem Kriterium

Anlagentechnik detailliert abbildbar
 Anwendbarkeit in frühen LP
 Funktionsebenen nach Leistungsphasen
 Hoher Aufwand bei der Anwendung
 Datengrundlage öffentlich verfügbar
 Datengrundlage nach EN 15804

Zunächst wird deutlich, dass der Fokus bestehender Methoden auf späteren Projektphasen liegt, weil eine bestimmte Detailtiefe der Planung vorhanden sein muss. Im gleichen Zug steigt auch die Komplexität der Datenerhebung und Auswertung und damit der Aufwand bei der Erstellung. Ebenfalls Einfluss auf den Aufwand hat die Verfügbarkeit der Datengrundlage. Wird auf detaillierte Hintergrunddaten zugegriffen, entstehen unter Umständen Kosten für die Datensätze und Ökobilanz-Software ist, im Gegensatz zu Microsoft Excel, nicht standardmäßig in jedem Planungsbüro vorhanden. Ein guter Ansatz ist daher die Verwendung der ÖKOBAUDAT. Tools, die diese Datenbasis nutzen, haben jedoch die gemeinsame Schwachstelle, gebäudetechnische Komponenten in den meisten Fällen nur vereinfacht abbilden zu können. Verschiedene Ebenen bei der Eingabe werden bisher nur in einzelnen Methoden angewendet (di Bari R. 2019).

Der Schwerpunkt des neuen Anlagenconfigurators wird daher auf eine Anwendung in frühen Leistungsphasen der Planung gelegt, was bedeutet, dass erste Abschätzungen schon mit sehr wenig projektspezifischen Informationen vorgenommen werden können. Es handelt sich dabei zwar ebenfalls um ein vereinfachtes Verfahren, es werden jedoch die wesentlichen Massen aller relevanter Komponenten erfasst und ausgewertet. Darüber hinaus werden repräsentative Bau-, Funktions- und Elementsysteme erarbeitet, die eine Verfeinerung der Eingabedaten im Lauf eines Projektes ermöglichen. Für die ersten Berechnungen wird der Fokus auf größeren Büro- und Verwaltungs-, Industrie- und Schul- bzw. Geschäftsgebäuden gelegt.

METHODE

Ziel des Vorgehens ist es, eine Datengrundlage und ein Berechnungstool für Komponenten der Kostengruppe 410, 420 und 430 zur qualifizierten Abschätzung der Umweltwirkungen aufzubauen und erste Benchmarks für verschiedene Nichtwohngebäude und Nutzungen zu generieren. Abbildung 2 zeigt die grundlegenden Schritte der Methode.

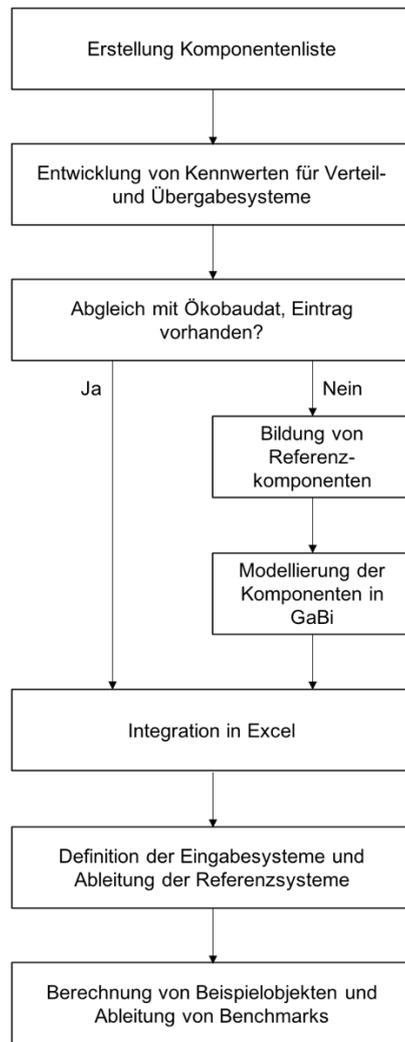


Abbildung 2: Einzelschritte zur Berechnung von Benchmarks haustechnischer Komponenten

Komponentenermittlung

Zunächst werden die relevanten Komponenten ermittelt und zusammengestellt. Als relevante Komponenten werden die Komponenten angesehen, die für die Art der Nutzung erforderlich sind, üblicherweise eingesetzt werden oder einen wesentlichen Massenanteil an der Gebäudetechnik haben.

Die ermittelten Komponenten werden in einzelne Leistungsbereiche gegliedert. Dies ist erforderlich, da die Masse und damit das Umweltprofil einer

Komponente von ihrer Leistung abhängig sind. In der Praxis kann eine einzelne Maschine meistens einen größeren Leistungsbereich abdecken, sodass eine Verringerung der Anzahl zu modellierenden Komponenten erreicht wird und dennoch ein breites Leistungsspektrum abgebildet werden kann. Die Teilungskriterien können zum Beispiel das Gewicht, die Stromaufnahme oder physikalische Eigenschaften, wie die Luftgeschwindigkeit im Gehäuse eines Lüftungsgerätes, sein. Diese Informationen können aus Herstellerunterlagen ermittelt und bewertet werden.

Da das Umweltprofil der Verteilung und Übergabe aufgrund des hohen Masseanteils grundsätzlich als relevant eingestuft wird und die bestehenden Verfahren zur Bestimmung von Leitungslängen ohne detaillierte Planung keine hinreichend genauen Ergebnisse liefern, werden neue Kennwerte für die Integration in das Berechnungstool abgeleitet. Auf die genaue Vorgehensweise bei der Kennwertermittlung für die Verteilung wird im Folgenden genauer eingegangen.

Kennwertermittlung für die Verteilung

Leistungsverzeichnisse aus bereits umgesetzten Projekten stellen für diese Ableitung die Grundlage dar, die zusammen mit weiteren projektspezifischen Größen ausgewertet wurden. Die Auswahl der zu erhebenden Daten wird zunächst je Gewerk festgelegt. Dabei werden alle wesentlichen Massen ermittelt, die Bestandteil der Verteilung sind. Tabelle 2 zeigt die diese Bestandteile für die Gewerke Heizung / Kälte, Lüftung, Sanitär und nutzerspezifische Anlagen. Darüber hinaus werden auch die objektspezifischen Daten, wie zum Beispiel die Nutzfläche, die Hüllfläche und auch die technische Ausstattung dokumentiert, um die ermittelten Kennwerte besser einschätzen und anpassen zu können.

Tabelle 2: Bestandteile der Verteilung nach Gewerk

Gewerk	Bestandteile der Verteilung
Heizung/Kälte	Länge Rohrleitung
	Anzahl Formstücke
	Mittlere Dimension
Sanitär	Länge Trinkwasserleitung
	Anzahl Formstücke Trinkwasser
	Mittlere Dimension Trinkwasser
	Länge Schmutzwasserleitung
	Anzahl Formstücke Schmutzwasser
Mittlere Dimension Schmutzwasser	
Lüftung	Fläche Kanalnetz
	Länge Alu-Flexschläuche
	Mittlere Dimension Alu-Flexschläuche
Nutzerspezifische Anlagen	Länge Rohrleitungen
	Anzahl Formstücke
	Mittlere Dimension Rohrleitungen

Die berechneten Projekte umfassen vier Büro- und Verwaltungsgebäude, drei Industriehallen und drei Schul- und Geschäftshäuser mit partieller Wohnungs-

nutzung. Um eine größtmögliche Auswahl und Detailtiefe zu erreichen, werden Daten aus den Leistungsverzeichnissen der Projekte erhoben, die in der folgenden Liste zusammengestellt sind.

- Objektspezifische Daten
- Technische Gebäudeausrüstung
- Leitungslängen getrennt nach Material und Dimension
- Formstücke getrennt nach Material, Dimension und Art des Formstücks
- Lüftungskanäle und Formstücke
- Wickelfalzrohre
- Flexible Aluminiumschläuche
- Anzahl Pumpen
- Anzahl Armaturen

Neben den erforderlichen Daten für die Ableitung der Kennwerte, sind die ausgewerteten Projekte auch Grundlage der ersten Berechnungen.

Modellierung

Die zur Bewertung der Gebäudetechnik erforderlichen Komponenten werden den vorhandenen Datensätzen in der ÖKOBAUDAT gegenübergestellt, um zu ermitteln, für welche Komponenten die Datengrundlage und die Modellierung erstellt werden muss. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um größere Komponenten für Nichtwohngebäude, wie große Wärmeerzeuger, Lüftungsgeräte und Kältemaschinen.

Um die Umweltwirkung der Komponenten abschätzen zu können, werden diese nach Typ gruppiert und es erfolgt eine Datenerhebung bei einer Auswahl an entsprechenden Herstellern. Diese haben die wesentlichen Materialien mit den zugehörigen Masseanteilen und ggfs. Produktionsschritte bereitgestellt, die dann mit GaBi Hintergrunddaten modelliert werden können.

Für jedes Material wurde die Vorkette mit einem passenden End-of-Life Szenario kombiniert, sodass die Komponenten anhand Ihrer Massenzusammensetzung berechnet werden können. Für die Herstellung wird ein generischer Prozess mit allen erforderlichen Materialien zur Modellierung der Komponenten als Inputs und der Komponente selbst als Output modelliert und mit entsprechenden Hintergrunddaten verknüpft. Im Fall des End-of-Life stellt die Komponente den Input und die einzelnen Materialien die Outputs dar, die mit einem üblichen, konservativen End-of-Life Datensatz verknüpft werden.

Um eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit der ÖKOBAUDAT zu erreichen, wurden die in Tabelle 3 dargestellten Wirkungskategorien für die Auswertung ausgewählt. Als Charakterisierungsmethode wurde CML 2001 Januar 2016 gewählt.

Tabelle 3: Ausgewählte Wirkungskategorien

Kategorie	Beschreibung	Referenzeinheit
ADPE	Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen	kg Sb Äq.
EP	Eutrophierungspotenzial	kg PO ₄ ³⁻ Äq.
ODP	Abbau potenzial der stratosphärischen Ozon-schicht	kg CFC11 Äq.
POCP	Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon	kg Ethen Äq.
GWP	Globales Erwärmungspotenzial	kg CO ₂ Äq.
AP	Versauerungspotenzial von Boden und Wasser	kg SO ₂ Äq.
PENRT	Total nicht erneuerbare Primärenergie	MJ
PERT	Total erneuerbare Primärenergie	MJ
PET	Total Primärenergie	MJ

Um eine größtmögliche Flexibilität in der Auswertung zu erhalten, werden die Umweltwirkungen der einzelnen Materialien massenbezogen ausgegeben und im Anlagenkonfigurator weiterverwendet. Dies ermöglicht das Anlegen neuer Komponenten, die mit den vorhandenen Materialien abgebildet werden können, ohne dass eine neue Modellierung in GaBi ts erforderlich ist. Für die Prüfung der Verknüpfungen innerhalb des Anlagenkonfigurators werden die Komponenten zusätzlich mit der Einheit "Stück" ausgegeben. Neben einigen Großkomponenten werden einfachere Bauteile wie Pumpen und verschiedene Rohrleitungen mit Datensätzen der ÖKOBAUDAT verglichen. Die Abweichung gegenüber den Datensätzen aus der ÖKOBAUDAT ist gering, weshalb die Grundkomponenten als validiert eingestuft werden können.

Anlagenkonfigurator

Um die Integration in den Planungsprozess zu erleichtern und schon zu Beginn mit wenigen Informationen Ergebnisse bereitstellen zu können, wird das Berechnungstool mit drei verschiedenen Eingabemasken ausgestattet. Die erste Stufe, das Bausystem, setzt dabei einen groben Rahmen für die Ausbildung und Nutzung eines Gebäudes. Vorhandene Informationen sind beispielsweise die Nutzung, die Fläche und ob ein hoher oder geringer energetischer Standard angestrebt wird. Die zweite Stufe, das Funktionssystem, detailliert den energetischen Standard in einzelne anlagentechnische Funktionssysteme, zum Beispiel eine Wärmepumpe als Wärmeerzeuger oder eine zentrale beziehungsweise dezentrale Lüftungsanlage. Dabei werden die Übergabe- und Verteilsysteme aus Kennwerten entsprechend der Eingabe ermittelt und berücksichtigt. Auf der dritten Stufe, dem Elementsystem, können die einzelnen Elemente frei eingegeben und kombiniert werden. Auch die Verteilung und die Übergabesysteme können in Anzahl und Ausführung frei gewählt werden. Der Detailgrad auf dieser Ebene entspricht in etwa dem der vorhandenen Tools für Bauprodukte.

Auf den verschiedenen Stufen sind demnach verschieden detaillierte Informationen für die Eingabe erforderlich. So sind im Bausystem die Nutzung, die

Fläche und der energetische Standard ausreichend, um eine erste Abschätzung treffen zu können. Im Funktionssystem kann zusätzlich die flächenbezogene Heiz- und Kühllast angegeben werden, um die erforderliche Größe und Anzahl der Komponenten genauer bestimmen zu können. Für die Eingabe im Elementsystem sind sämtliche Informationen zum Erzeuger, der Art, Länge und Ausführung der Verteilung sowie den Übergabesystemen erforderlich. So kann auch eine detaillierte Berechnung auf Basis von Leistungsverzeichnissen oder Massenausügen erfolgen. Abbildung 3 zeigt die Eingabemöglichkeiten und die vordefinierten Größen für jedes Eingabesystem.

Das eigentliche Berechnungsprinzip ist bei allen Eingabearten identisch. Jeder Komponente sind die potentiellen Umweltwirkungen zugeordnet, die aus GaBi Hintergrunddaten oder der ÖKOBAUDAT stammen. Rohrleitungen und Dämmstoffe werden in eine Masse umgerechnet, der wiederum die Umweltwirkungen zugeordnet werden. Die einzelnen Komponenten und Systeme werden, je nach Auswahl, zusammengesetzt und aufaddiert. Aufgeschlüsselt nach Herstellung und End-of-Life und ausgewiesen nach Kostengruppen und der Summe KG400 wird für jede Wirkungskategorie ein Diagramm ausgegeben.

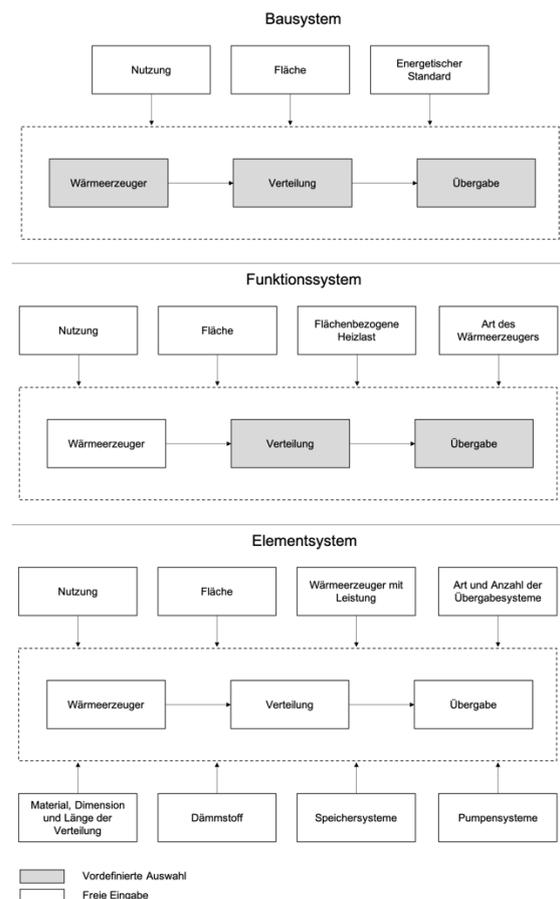


Abbildung 3: Eingabegrößen in den einzelnen Systemen

ERGEBNISSE

Um den erstellten Anlagenkonfigurator zu prüfen und den Einfluss der Anlagentechnik auf das Umweltprofil des Gebäudes zu bestimmen, wurden verschiedene Beispielobjekte mit GaBi Hintergrunddaten aus dem Servicepack 35 (2018) berechnet. Insgesamt zehn Büro- und Verwaltungsgebäude, Industriebauten und Schul- und Geschäftsgebäude mit unterschiedlicher Ausstattung wurden betrachtet, deren wesentliche Kenndaten in Tabelle 4 dargestellt sind.

Tabelle 4: Technische Ausstattung der berechneten Beispielobjekte

Nutzung	Fläche	Wärmeerzeuger	Kälteerzeuger	Lüftungsanlagen
Büro	13.500 m ²	Fernwärme, HK, BKT, FBH	Fernkälte, siehe WE	4x zentral, 52.000 m ³ /h
Büro	7.400 m ²	Brennwertk., Heiz-/Kühldecke	2x KKM	1x zentral, 36.000 m ³ /h
Büro	1.900 m ²	BHKW, BKT, Heizflächen	AKM, KKM, BKT, siehe WE	1x zentral, 10.000 m ³ /h
Büro	11.900 m ²	WP, Brennwertk., FBH, Konv.	KKM, siehe WE	9x zentral, 56.000 m ³ /h
Schule	5.500 m ²	Fernwärme, Konvektoren	-	1x zentral, 17.000 m ³ /h
Schule	6.800 m ²	Fernwärme, HK, FBH	-	2x dezentral, 2.900 m ³ /h
Ärztelhaus	10.700 m ²	Brennwertk. HK, FBH, Solarth.	-	4x dezentral, 7.000 m ³ /h
Industrie	5.900 m ²	Anbindung an Bestand, HK	-	4x zentral, 100.000 m ³ /h
Industrie	4.700 m ²	2 Brennwertk., Heiz-/Kühldecke	2x KKM	6x zentral, 100.000 m ³ /h
Industrie	9.100 m ²	Dunkelstrahler, Brennwertk., FBH	-	1x zentral, 10.000 m ³ /h

Aus den Ergebnissen wurden flächenbezogene Benchmarks erstellt. In Abbildung 4 sind die Kennwerte für das Treibhauspotenzial dargestellt, anhand dessen die Erkenntnisse erläutert werden. Das Diagramm zeigt auf der Y-Achse den jährlichen flächenbezogenen Ausstoß von kg CO₂-Äquivalenten über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren und einer Lebensdauer der Anlagentechnik von 20 Jahren. Angegeben werden der Minimal- und Maximalwert sowie der Median für die jeweilige Nutzung. Obwohl eine recht geringe Anzahl an Objekten jeder Nutzung berechnet wurde, zeichnen sich einige Tendenzen ab. Zunächst liegt der Kennwert für Bürogebäude grundsätzlich in einem plausiblen Bereich. Oft werden etwa 1,5 kg CO₂-Äq./m²a als überschlägige Größe angenommen. Darüber hinaus variieren die Werte je nach Ausstattung. So besitzt das Objekt, das nach oben hin ausreißt, einen extrem hohen technischen Standard und zudem eine vergleichsweise geringe Fläche.

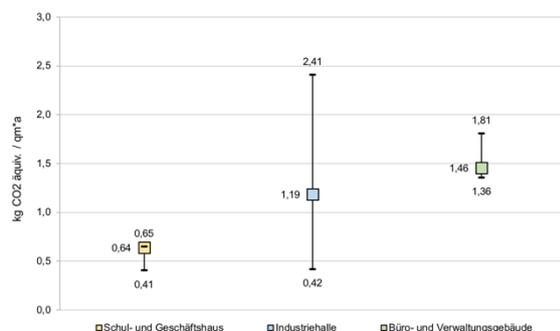


Abbildung 4: Kennwerte zur Bestimmung des Treibhauspotenzials anhand der Fläche

Dass Industrieobjekte eine große Varianz aufweisen, ist durch ihre Heterogenität begründet. Maßgebend für die Ergebnisse ist, ob z.B. eine Produktionshalle

gekühlt und/oder belüftet wird. Weil Hallengebäude für die Industrie meistens große Hüllflächen besitzen wird die technische Ausstattung entsprechend groß dimensioniert und der Impact je Fläche fällt relativ hoch aus. Die Industrieprojekte wurden daher so ausgewählt, dass eine unbelüftete und ungekühlte Halle auf der einen Seite sowie eine belüftete und gekühlte Halle auf der anderen Seite die minimale und maximale Ausstattung widerspiegeln. Der Median ist in diesem Fall besonders aussagekräftig, da er eine belüftete, aber ungekühlte Halle repräsentiert.

Auch dass die untersuchten Schul- und Geschäftsgebäude ein geringeres Treibhauspotential aufweisen als Industrie- und Bürogebäude, lässt sich begründen. Zum einen ist das A/V-Verhältnis im Vergleich zu Industriehallen oft besser, zum anderen sind Gebäude dieser Nutzung oftmals nicht gekühlt. Auch auf Lüftungsanlagen wird häufig verzichtet, entsprechend gering fällt das Treibhauspotential für die Herstellung und das Lebensende aus.

DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Obwohl die Methode primär für die Anwendung in den Kostengruppen 410, 420 und 430 entwickelt wurde, lässt sie sich prinzipiell auf die gesamte Kostengruppe 400 anwenden. Einschränkungen können sich bei der Anwendung des vereinfachten Bau- und Funktionssystems ergeben, da Kennwerte für die Verteil- und Übergabesysteme vorliegen müssen. Speziell in den Kostengruppen 480 (Gebäudeautomation) und 440 (Starkstromanlagen) sind diese in großem Maß von der Ausstattung und der Nutzung abhängig. Diese Abhängigkeiten führen bei der Umsetzung entweder zu einem hohen Aufwand bei der Erstellung und Anwendung des Tools oder zu Ungenauigkeiten bei den Ergebnissen, die durch Vereinfachungen hervorgerufen werden.

Um unkompliziert weitere Komponenten abschätzen und eine generische Komponente der KG 400 erstellen zu können, wurden bei der Materialauswahl Vereinfachungen vorgenommen. Verdeutlicht werden kann dies am Beispiel von Kunststoff. Für die größtmögliche Genauigkeit müssten die Kunststoffe getrennt und detailliert betrachtet werden. Dies führt jedoch zu einer sehr großen Anzahl an Eingangsgrößen, die unter Umständen nur einer einzigen Komponenten zugeordnet werden. Aus diesem Grund wurde ein repräsentativer Kunststoff gesucht. Abbildung 5 zeigt den Vergleich des Treibhauspotenzials verschiedener Kunststoffe. Auf der Y-Achse ist das Treibhauspotenzial (GWP) der einzelnen Materialien in kg CO₂-Äq./kg Material aufgetragen. Auf der X-Achse sind unterschiedlich Kunststoffe dargestellt, die verglichen werden sollen. Es zeigte sich, dass die Abweichung des GWP bis auf wenige Ausnahmen in einem geringen Rahmen liegt. In diesem Fall könnte hochverdichtetes Polyethylen als optimistischer, Polystyrol als konservativer Ansatz verwendet werden.

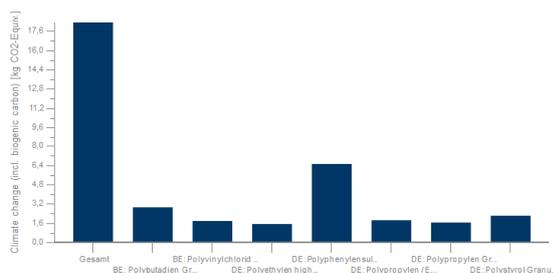


Abbildung 5: Übersicht über das Treibhauspotenzial verschiedener Kunststoffe

Durch die Integration des Bau- und des Funktionssystems kann eine Berechnung des Objekts bereits mit wenigen Informationen durchgeführt und der Rahmen, in dem sich die Ergebnisse bewegen, abgesteckt werden. Damit wird der Anforderung Rechnung getragen, das Tool auch in frühen Projektphasen oder für eine schnelle Abschätzung der Anlagentechnik anwenden zu können. Durch die Auswahl verschiedener Systeme unter denselben Randbedingungen können die Ergebnisse miteinander verglichen werden und so in den Entscheidungsprozess mit einfließen. Dennoch wird es durch die Integration des Elementsystems ermöglicht, beliebige Komponenten und Übergabesysteme unter Verwendung konkreter Leistungsbereiche, Materialien und Leitungslängen abzubilden. Dieser Spagat bedingt die Festlegung einiger Randbedingungen wie Rohrmaterial, Leitungslängen, Dimensionen und der Komponenten in den vereinfachten Systemen. Diese "Standardfälle" wurden basierend auf Erfahrungswerten im Bereich der Planung gebäudetechnischer Anlagen durch den Ersteller festgelegt und unterliegen seiner subjektiven Einschätzung. Es werden daher regionale Schwankungen erwartet, und vorherrschende Standards z.B. verschiedener Ingenieurbüros können einen Einfluss haben.

Wenngleich Gebäude immer individuell und in der Regel entsprechend den Anforderungen des Nutzers geplant werden, sind die Grundkomponenten bestehend aus Gründung, Tragwerk, Gebäudehülle und technischer Ausrüstung oftmals ähnlich beziehungsweise mit einer geringen Anzahl an Komponenten abbildbar. Für eine detaillierte Abschätzung der Umweltwirkungen von gebäudetechnischen Komponenten ist es weniger relevant, welches Fabrikat mit welchem Funktionsumfang letztendlich eingesetzt wird, sondern vielmehr, dass die Komponenten als solche in der passenden Leistungsklasse berücksichtigt werden. Vor diesem Hintergrund müssen auch die Ergebnisse bewertet werden, die sowohl in Form des Berechnungswerkzeuges als auch in Form der Berechnung von Beispielgebäuden erarbeitet wurden. Bei der Zusammenstellung der Komponenten wurde großen Wert daraufgelegt, möglichst viele Komponenten zu erfassen, die auch über die gängigen

Standardfälle hinausgehen. So wurden beispielsweise im Bereich Industrie Gas-Dunkelstrahler mit in die Liste aufgenommen. Für Büro-, Verwaltungs- und Schul- bzw. Geschäftshäuser wurden Blockheizkraftwerke und Absorptionskältemaschinen erfasst, denen aus wirtschaftlichen Gründen oftmals Brennwertkessel und Kompressionskältemaschinen vorgezogen werden. Um das Tool zu validieren und zu testen, wurden einige Beispielobjekte berechnet und aus den Ergebnissen Benchmarks für die Wirkungskategorien erstellt.

Dabei soll der Benchmark zum Treibhauspotenzial genauer erläutert werden. Für Büro- und Verwaltungsgebäude liegt das flächenbezogene Treibhauspotenzial zwischen 1,36 und 1,81 kg CO₂-äq./m²a bei einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren. In diesen Zahlen ist die Lebensdauer der Anlagen konservativ mit 20 Jahren angenommen. In der Praxis werden je nach Komponente auch 30 bis 40 Jahre erreicht. Für Industriehallen liegt der Benchmark bei 0,42 bis 2,41 kg CO₂-äq./m²a Die Auswahl der Projekte umfasst dabei die minimale und maximale Ausstattung von Industriehallen. Der Kennwert für Schul- und Geschäftshäuser liegt erwartungsgemäß etwas niedriger bei 0,41 bis 0,65 kg CO₂-äq./m²a was auf eine geringere technische Ausstattung zurückzuführen ist. Hierzu ist jedoch anzumerken, dass keine gekühlten Gebäude dieser Nutzung betrachtet wurden, der Kennwert also im oberen Bereich zu optimistisch dargestellt wird.

Entgegen der Vereinfachung im BNB werden die Verteil- und Übergabesysteme grundsätzlich als relevante Bauteile eingestuft, die einen erheblichen Anteil an der Gesamtmasse gebäudetechnischer Anlagen ausmachen und in der Regel aus Metallen oder Kunststoffen bestehen, deren Umweltwirkungen generell hoch sind. Diese Erwartung konnte durch die Berechnungen validiert werden. Im Bereich Lüftung wurde festgestellt, dass das Treibhauspotenzial der Verteilung und Übergabe bis zu 60 % an dem der Kostengruppe 430 ausmachen kann. Im Bereich Heizung liegt dieser Anteil sogar bei bis zu 80 % an der KG 420. Je größer die Objekte sind, umso stärker tritt dieser Effekt auf. Dies lässt sich damit begründen, dass die Verteilung und Übergabe nahezu linear mit zunehmender Fläche ansteigen. Bei den Erzeugern ist dies nicht der Fall, da die Maschinen im Normalfall einen größeren Leistungsbereich abdecken können. Es sind zwar Sprünge beim Gewicht der Anlagen vorhanden, jedoch nicht im gleichen Maße wie bei der Verteilung und Übergabe.

Im Zuge der Validierung ist aufgefallen, dass bei einigen Großkomponenten der ÖKOBAUDAT, namentlich zentrale Lüftungsgeräte und Wärmepumpen, die Modellierung fehlerhaft ist und die Umweltwirkungen zu gering bewertet werden. Dies ist insofern als kritische Erkenntnis einzustufen, als dass ein Großteil der verfügbaren Methoden zur Bestimmung von Umweltwirkungen auf die

Datensätze der ÖKOBAUDAT setzen und Zertifizierungen auf dieser Basis erteilt werden. An diesem Beispiel wird deutlich, dass der Einfluss der Anlagentechnik von Gebäuden in der Ökobilanzierung aktuell unterschätzt wird.

AUSBLICK

Die gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass gebäudetechnische Komponenten detaillierter und in größerem Maßstab zu untersuchen sind und eine Grundlage an Datensätzen für die Verwendung in Nichtwohngebäuden geschaffen werden muss. Darüber hinaus müssen die bestehenden Datensätze der ÖKOBAUDAT im Detail geprüft und an den Stand der Technik angepasst werden.

Darüber hinaus soll die Nutzungsphase unter Berücksichtigung wesentlicher Randbedingungen ebenfalls in den Anlagenkonfigurator integriert werden. Dies ermöglicht die Ermittlung des break-even-points und gibt eine Antwort auf die Frage, in wie weit sich der Einsatz von gebäudetechnischen Anlagen lohnt. Oft kann ein geringerer Energiestandard nur durch den Einsatz von effizienterer Gebäudetechnik erreicht werden, zum Beispiel durch den Einsatz eines Lüftungsgerätes mit Wärmerückgewinnung. Wenn die Emissionen in der Nutzungsphase zukünftig weiter sinken, steigt zwangsweise der Anteil der Herstellung und Konstruktion der Gebäudetechnik ohne die das Erreichen des höheren Standards in erster Linie jedoch nicht möglich gewesen wäre. Das bedeutet, es muss immer der Gesamtimpact betrachtet werden. Damit steigt auch die Relevanz der Bewertung von Herstellung und End-of-Life der Haustechnik selbst.

Weitergehend könnten zukünftig dynamische Stromprofile variable Lebensdauern der Komponente in die Betrachtung mit einbezogen werden.

LITERATUR

Di Bari R. et al., 2019, Step-by-step implementation of BIM-LCA: A case study analysis associating defined construction phases with their respective environmental impacts

Bionova Ltd (Hrsg), 2018 OneClick LCA <https://www.oneclicklca.com/>

Bundesgesetzblatt Jahrgang 2013 Teil I Nr. 67, 2013, Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung

Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung, (Hrsg), 2015, eLCA <https://www.bauteileditor.de>

Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, (Hrsg), 2020, Ökobaudat <http://www.oekobaudat.de>

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau, und Reaktorsicherheit (Hrsg) 2016. Klimaschutzfahrplan 2050

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg), Bekanntmachung über die Nutzung und die Anerkennung von Bewertungssystemen für das nachhaltige Bauen, 2010

CAALA GmbH (Hrsg), 2018 CAALA Software <https://caala.de/>

DIN Deutsches Institut für Normung e. V (Hrsg), 2018, Kosten im Bauwesen (DIN 276:2018)

DGNB GmbH (Hrsg), 2020, DGNB Navigator <https://www.dgnb-navigator.de>

Europäische Kommission (Hrsg) 2018, 2030 climate & energy framework

Europäisches Komitee für Normung (Hrsg), 2006, Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006)

Europäisches Komitee für Normung (Hrsg), 2006, Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006)

Fraunhofer Institut für Bauphysik (Hrsg), 2020, GENERIS <https://www.generis.live/>

Gantner, J. et al., 2018, Ökobilanz - Integration in den Entwurfsprozess

Gantner, J. et al., 2018, Ökobau.dat 3.0-Quo Vadis? Buildings 2018, 8, 129

HOINKA GmbH (Hrsg), 2019, Ökobilanz Bau, <https://www.oekobilanz-bau.de>

Ibn-Mohammed T. 2013. Operational vs. embodied emissions in buildings - A review of current trends

Passer A. 2010. Zur Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden

Passer A. et al. 2012, Assessment of the environmental performance of buildings: A critical evaluation of the influence of technical building, Int J Life Cycle Assess (2012) 17:1116-1130

equipment on residential buildings

Pohl S. 2014. Analyse der Rechenverfahren für die Ökobilanzierung im Bewertungssystem nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude (BNB)

Stoffregen et al. 2010. Endbericht Ökologische Bewertung der Haustechnik

Weißberger M. 2016. Lebenszyklusorientierte Analyse der ökologischen Eigenschaften von Niedrigstenergiewohngebäuden unter besonderer Berücksichtigung der Gebäudetechnik

thinkstep AG (Hrsg), 2018, SBS Building Sustainability, <https://www.sbs-onlinetool.com>

Umweltbundesamt. 2018. Energiesparende Gebäude

WEKA MEDIA GmbH (Hrsg), 2018, Legep <https://www.weka-bausoftware.de/legep>

AUSWIRKUNGEN KLIMATISCHER VERÄNDERUNGEN AUF DIE ÜBERHITZUNG VON GEBÄUDEN

M. Vukadinovic¹, C. Kempkes² und A. Maas¹

¹Fachgebiet Bauphysik, Universität Kassel, Kassel, Deutschland

²Ingenieurbüro Prof. Dr. Hauser GmbH, Kassel, Deutschland

KURZFASSUNG

Vor dem Hintergrund klimatischer Veränderungen, verbunden mit steigenden Außenlufttemperaturen und länger anhaltenden Hitzeperioden, kommt dem sommerlichen Wärmeschutz von Gebäuden künftig ein noch höherer Stellenwert zu. Eine wesentliche Bedeutung zur realistischen Bewertung des thermischen Komforts im Sommer hat die ortsgenaue Erfassung meteorologischer Expositionen. Die durchgeführten Untersuchungen beschäftigen sich mit deutschlandweiten thermisch-dynamischen Simulationen und sich daraus ergebenden Auswirkungen auf das sommerliche Wärmeverhalten von Gebäuden im Klimawandel. Es werden die sich in einem definierten Prüfraum ergebenden Übertemperaturgradstunden (Gh26-Werte) für ein Jahr berechnet. Dabei werden verschiedene Verteilungen von Sommerklimaregionen in den unterschiedlichen Zeiträumen 1995-2012 (TRY 2015) und 2030-2060 (TRY 2045) betrachtet. Die Untersuchungen der TRY 2015 und TRY 2045 zeigen, dass bei Weiterentwicklungen der planerischen und normativen Anforderungen eine differenzierte Berücksichtigung der Klimaregionen erfolgen sollte.

ABSTRACT

Against the background of climatic changes, combined with rising outside air temperatures and prolonged hot spells, the summer thermal protection of buildings will become even more important in the future. The localised recording of meteorological exposures is of major importance for the realistic assessment of thermal comfort in summer. The conducted investigations deal with Germany-wide thermal-dynamic simulations and the resulting effects on the summer thermal behaviour of buildings in climate change. The overtemperature degree hours (Gh26-values) resulting in a defined test room are calculated for one year. Different distributions of summer climate regions in the different periods 1995-2012 (TRY 2015) and 2030-2060 (TRY 2045) are considered. The investigations of TRY 2015 and TRY 2045 show that a differentiated consideration of the climate regions should be made in further developments of the planning and normative requirements.

EINLEITUNG

In Deutschland ist in den Sommermonaten eine zunehmend steigende Hitzebelastung zu beobachten. Laut Deutschem Wetterdienst (DWD) war das Jahr 2018 das bisher wärmste in Deutschland beobachtete Jahr seit Beginn regelmäßiger Aufzeichnungen im Jahr 1881 (K. Friedrich und F. Kaspar 2019). In einigen Regionen Deutschlands führen extreme Wetterlagen zunehmend dazu, dass die als komfortabel empfundenen Raumlufttemperaturen (i. d. R. zwischen 22 °C und 25 °C (Petzold 1983)) über mehrere Wochen hinweg überschritten werden. Dies führt zu einer Verminderung der klimatischen Behaglichkeit im Innenraum und hat negative Auswirkungen auf die Luftqualität (Kommission Innenraumlufthygiene (Hg.) 2019) und die Leistungsfähigkeit der sich im Gebäude befindenden Personen (Hellwig et al. 2012; Fitzner 2013). Zusätzlich führen im Trend steigende Fensterflächenanteile von Gebäuden, gepaart mit hohem Wärmeschutz, zu sommerlichen Überhitzungen (Rouvel 2000). Daraus ergibt sich ein Handlungsbedarf, die Empfehlungen zur Vermeidung sommerlicher Überhitzung an die sich verändernden klimatischen Einflussgrößen anzupassen, sowohl im Neubau als auch im Bestandsbau. Für die öffentlich-rechtliche Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes wird in Deutschland die DIN 4108-2:2013-02 verwendet (Bundesregierung (Hg.) 2015). Anforderungswerte zur Vermeidung sommerlicher Überhitzung werden bundesweit nach drei verschiedenen Klimaregionen unterschieden. Dies ergibt eine einfache Form der Berücksichtigung meteorologischer Einflüsse. Auftretende Hitzeperioden sind jedoch regional sehr unterschiedlich. Daher ist es von besonderer Bedeutung, meteorologische Expositionen ortsgenau zu erfassen, um eine realistische Bewertung vornehmen zu können.

Es gibt verschiedene Faktoren, welche das Sommerklima im Inneren von Gebäuden beeinflussen. Planerische Möglichkeiten zur Anpassung klimatischer Verhältnisse sind der Fensterflächenanteil, die Orientierung der Fenster, die Energietransmission durch Fenster (g-Wert und Fc-Wert), die Möglichkeit zur Nachtlüftung, der

Wärmeschutz der Gebäudehülle und die Wärmespeicherfähigkeit der Baustoffe (Borsch-Laaks 2011; Kehl 2010). Die beiden letztgenannten Möglichkeiten sind bei zunehmend lang anhaltenden Hitzeperioden jedoch in geringerem Maße relevant. Nicht beeinflussbar sind mesoklimatische Standorte und damit die Sommerklimaregionen.

Die durch (Schlitzberger 2014) durchgeführten Untersuchungen haben sich mit der Weiterentwicklung der Nachweisverfahren zum sommerlichen Wärmeschutz gem. DIN 4108-02:2003-07 unter Berücksichtigung damals aktueller meteorologischer Veränderungen beschäftigt. Daraus ging unter anderm eine Novellierung zur aktuell gültigen DIN 4108-2 hervor, welche auch eine Überarbeitung der Sommerklimaregionen beinhaltet.

Im Jahr 2017 hat der Deutsche Wetterdienst (Deutscher Wetterdienst (Hg.) 2016) für das Bundesgebiet flächendeckend neue Testreferenzjahre TRY 2015 und TRY 2045 mit einer bis dahin nicht erreichten räumlichen, fein gegliederten Auflösung von 1km² veröffentlicht. Diese Klimadaten ermöglichen eine Bestimmung sommerlicher Übertemperaturen in Aufenthaltsräumen unter Berücksichtigung regional differenzierter klimatischer Expositionen. Mit den Klimadaten der TRY 2015 und TRY 2045 sind zum Teil signifikante Abweichungen hinsichtlich einer möglichen Einteilung von Sommerklimaregionen im Vergleich zur bisherigen Bewertung gem. DIN 4108-2:2013-02 zu erwarten.

METHODE UND SIMULATIONEN

Klimatologische Entwicklung am Standort Kassel

Eine 2006 (Hauser et al. 2006) veröffentlichte Untersuchung vergleicht für den innerstädtischen Standort Kassel zehn zwischen 1994 und 2003 messtechnisch gewonnene Datensätze mit dem damals aktuellen DWD TRY 2004 Nr. 7, welches einer Messstation am Stadtrand von Kassel zugeordnet ist. Die vom DWD in 2004 veröffentlichten TRY setzen sich aus meteorologischen Messdaten des Zeitraums 1961 bis 1990 zusammen.

Es stellt sich heraus, dass die innerstädtisch gewonnenen Datensätze bei den Temperaturwerten und bei der Dauer der Hitzeperioden weit über den Werten des extrem warmen Sommers DWD TRY Nr. 7 liegen. Dies ist zum einen auf den stadtklimatischen Effekt und zum andern auf Auswirkungen des Klimawandels zurückzuführen (Hauser et al. 2006). Testreferenzjahre des DWD sind mittelwerttreu erstellt worden, d. h. sie spiegeln annähernd die Mittelwerte des repräsentierten

Zeitraums wieder (Webs et al. 2004). In diesem Fall entspricht das etwa dem durchschnittlichen Klima um das Jahr 1975.

Mit den vom DWD 2017 veröffentlichten TRY sind erstmals stadtklimatologische Effekte und die Abhängigkeit von Lufttemperatur und Höhenlage direkt in den Datensätzen implementiert (Deutscher Wetterdienst (Hg.) 2017). Vorherige Betrachtungen der DWD TRY sind normativ ohne Stadtklimaeffekt und Höhenabhängigkeit ausgeführt. Laut DWD können Großstädte zeitweise 6 – 8 K wärmer als das Stadtumland sein. Im Jahresmittel sind Abweichungen von 0,5 – 2 K üblich (Deutscher Wetterdienst (Hg.) 2017).

Dementsprechend soll das ortsgenaue DWD TRY 2015 für einen innerstädtischen Standort in Kassel annähernd das Klima zwischen 1995 und 2012 widerspiegeln und dabei eine stadtklimatologische Bewertung beinhalten. Es lässt sich annehmen, dass mittlere Temperaturwerte und die Dauer von Hitzeperioden in guter Näherung mit gemessenen Werten aus diesem Zeitraum korrelieren.

Das ortsgenaue DWD TRY 2045 soll das zukünftige Klima vorhersagen. Mit fortschreitendem Klimawandel ist zu erwarten, dass mittlere Temperaturwerte und die Dauer von Hitzeperioden in diesen TRY oberhalb aktuell gemessener Werte für einen innerstädtischen Standort liegen. Besonders dann, wenn man extreme Sommer TRY vergleicht. Um dies zu untersuchen, sind in Abbildung 1 auf das Außenklima (!) bezogene Übertemperaturgradstunden über 26 °C (Gh26-Werte), die Mittelwerte der Jahres- und Sommer Außentemperaturen für den Zeitraum 1995 bis 2012 und das für diesen Zeitraum repräsentative, drittwärmste Jahr 1997 sowie das Jahr 2018 dargestellt (die mit „Messung“ bezeichneten Säulengruppen). Ebenso aufgeführt sind Daten und Auswertungen der Testreferenzjahre für die Zeiträume 1988 bis 2007 (TRY 2011), 1995 bis 2012 (TRY 2015) und 2030 bis 2060 (TRY 2045).

Bezüglich der Angaben der Testreferenzjahre ist zu berücksichtigen, dass die Daten des TRY 2011 aus den Messdaten einer Station am Stadtrand generiert wurden. Die Werte für die TRY 2015 hingegen repräsentieren „ortsgenau“ den Standort der Universität Kassel und sind damit direkt mit den zuvor genannten Messungen vergleichbar.

Die Messdaten stammen von der Universität Kassel. Die Jahre 2011 bis 2016 und fehlende Werte aufgrund stunden- bis tageweiser Messausfälle wurden mittels Datenbanken vom HLUNG und dem Fraunhofer IWES ergänzt.

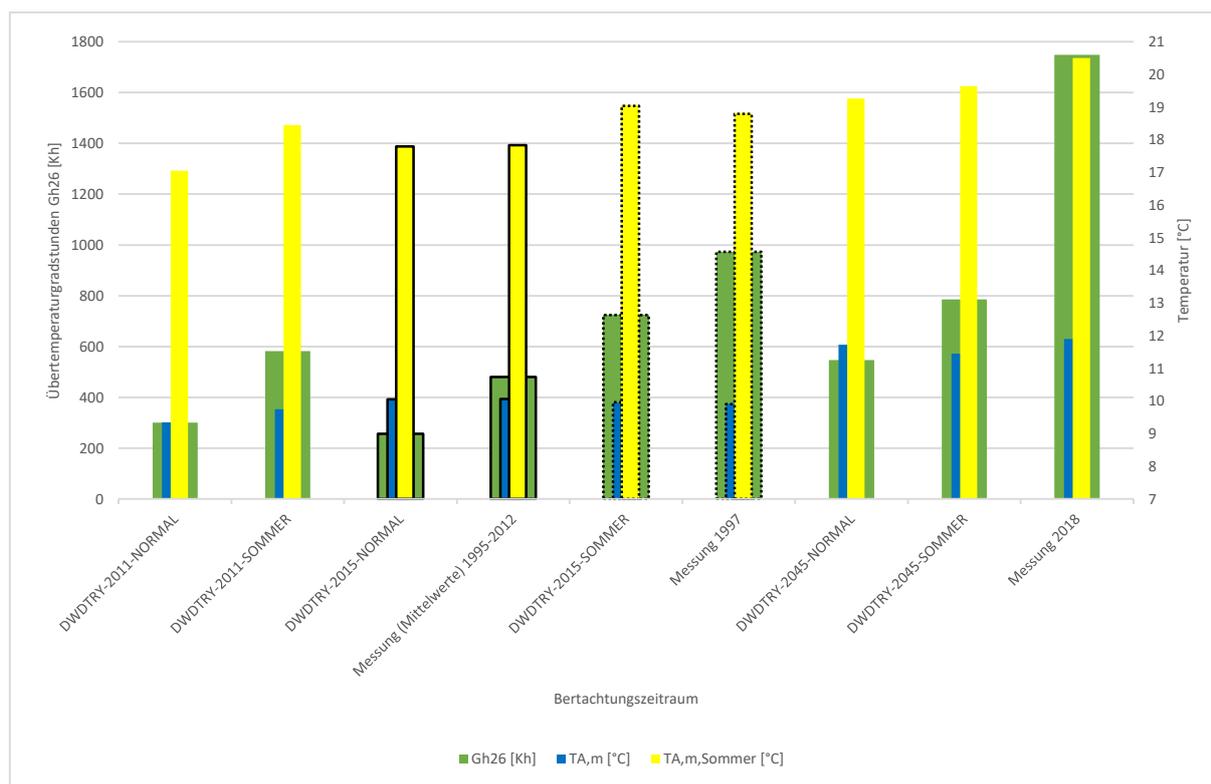


Abbildung 1: Klimata der DWD TRY und Messungen für Kassel Stadtmitte im Vergleich – Übertemperaturgradstunden über 26 °C Außenklima

Wie Abbildung 1 zeigt, ist im Messzeitraum 1995 bis 2012 eine gute Übereinstimmung der Mittelwerte der gemessenen Temperaturen mit den Daten des TRY 2015 Normaljahrs für den gleichen Standort zu erkennen (schwarze durchgezogene Rahmen). Dies gilt sowohl für die über den Messzeitraum gemittelten Jahres-Mitteltemperaturen (blaue Säule – jeweils ca. 10 °C) als auch für die über den Messzeitraum gemittelten Sommer-Mitteltemperaturen (gelbe Säule – jeweils ca. 18 °C). Allerdings ist bei den auf das Außenklima bezogenen Übertemperaturgradstunden über 26 °C (grüne Säule) eine deutliche Abweichung zu sehen. Für das TRY 2015 Normaljahr am Standort der Universität Kassel ergeben sich 256 Kh über 26 °C. Der Mittelwert der Gh26-Werte aus den Messungen für den gleichen Standort beträgt 480 Kh und ist damit in etwa doppelt so groß. Folglich sind am innerstädtischen Standort Kassel exemplarisch längere Hitzeperioden bzw. zeitweise größere Außentemperaturen aufgetreten als mit den DWD TRY zu erwarten sind. Auf Basis von Messwerten bestimmte Übertemperaturgradstunden in den jeweils repräsentativen wärmsten Jahren (schwarze gestrichelte Rahmen) der betrachteten Zeiträume liegen zusammen mit einer Messung aus dem Jahr 2018 sogar deutlich oberhalb der TRY Werte eines extrem warmen Sommers für das Jahr 2045.

Die besonders hohen Abweichungen werfen die grundsätzliche Frage auf, welche der DWD TRY im Jahr 2020 und für die nähere Zukunft zu einer

realistischen Bewertung von Raumüberhitzungen herangezogen werden können.

Deutschlandweite Simulationen eines Modellraums mit den normal TRY 2011, 2015 und 2045

Das thermische Verhalten und der Energiebedarf für Heizen resp. Kühlen des Modellraums wird mittels thermisch-dynamischer Simulationsrechnung aufgrund der sehr guten Stapelverarbeitbarkeit mit dem Programm HAUSER ermittelt. Dieses ist erstmalig in (Hauser 1977; Hauser 1978) beschrieben und dokumentiert. Das Programm ist im Fortranquellcode geschrieben, somit besteht auf einfache Weise die Möglichkeit, Ausgabedateien in beliebiger Formatierung für die Weiterverarbeitung zu generieren. Das Compilat weist bei extrem geringen Systemressourcen eine sehr gute Rechenperformance auf. Die Eingabe der Randbedingungen und die Auswertung erfolgt in Stundenwerten (8760 Werte für das Jahr), der eigentliche Berechnungszeitschritt liegt mindestens eine Größenordnung darunter, d. h. standardmäßig bei 6 Minuten. In jedem Zeitschritt werden die Temperaturverläufe sämtlicher Bauteile unter den momentanen Randbedingungen durch numerisches Lösen der eindimensionalen Fourier Wärmeleitungsgleichung mit Hilfe eines Finite-Differenzen-Verfahrens nach Crank-Nicolson bestimmt und für die jeweilige Gebäudezone die Bilanz aus Wärmegewinnen (solare und interne Wärmeeinträge) und Wärmeverlusten (Transmission

und Lüftung) gebildet. Das im Rechenmodell gewählte numerische Lösungsverfahren mit bekanntem Stabilitätskriterium liefert für baupraktisch übliche Bauteilkonstruktionen ab der Zeitschrittweite von 6 Minuten regelmäßig stabile Lösungen. Nur in Ausnahmefällen – d.h. Wärmequellen oder -senken auf extrem leichten Bauteilschichten mit geringer Wärmeleitfähigkeit – tritt die für das Crank-Nicolson-Verfahren bekannte Oszillation auf, was in den meisten Fällen durch eine Reduktion des Berechnungszeitschrittes bei entsprechender Erhöhung der Rechenzeit kompensiert werden kann. Eine Validation des zugrunde gelegten Rechenmodells erfolgte u. a. im Rahmen der Mitarbeit in den einschlägigen Normungsgremien zu den internationalen Normen DIN EN ISO 13790-13792, die neben einer Überprüfung des Gesamtmodells auch Testfälle zu den einzelnen Phänomenen Wärmeleitung, Wärmespeicherung und -strahlung beinhalten.

Die durchgeführte Untersuchung beschäftigt sich mit sommerlichen Überhitzungen eines definierten Prüfraumes unter Zugrundelegung der DWD TRY 2015 und TRY 2045. Das Kernelement bildet eine relativ zueinander betrachtete Analyse und anschließende Bewertungen von Raumüberhitzungen mittels der flächendeckend vorliegenden Klimadaten für das Bundesgebiet im 1 km² Raster. Dabei werden Differenzen identifiziert, welche sich im Vergleich zur bisherigen Annahme eines Referenzklimas gemäß Sommerklimaregion ergeben. Neben einem Datensatz für mittlere TRY beinhaltet die Veröffentlichung des DWD auch extreme Sommer und Winter TRY. Die Untersuchungen werden hier ausschließlich mit den mittleren TRY durchgeführt. Ergebnisgrößen sind im Sinne einer Raumantwort auf Überhitzungen (Schlitzberger 2014) Übertemperaturgradstunden über 26 °C, diesmal aber – gegenüber den Auswertungen zu Abbildung 1 – wie üblich bezogen auf die operative Raumtemperatur (DIN 4108-2:2013-02).

Die Identifikation der Raumüberhitzungen erfolgt in einem Modellraum in Anlehnung an DIN EN ISO 13792:2012-08 (Abbildung 2). Die Wahl der Raumgeometrie ist für die hier vorliegende relative (!) Untersuchung klimatischer Randbedingungen zunächst nicht relevant. Der Raum wurde bewusst mit einem horizontalen Dachfenster gerechnet, um klimatische Auswirkungen, insbesondere der Globalstrahlung, orientierungsunabhängig zu bewerten und das sogenannte „Ost-West-Problem“ auszuschließen (Lam und Hiller 2014).

Die Fensterfläche beträgt 5,04 m², so dass sich ein grundflächenbezogener Fensterflächenanteil von 25 % ergibt. Die Simulationsrandbedingungen sind gemäß DIN 4108-02:2013-02 gewählt. Dabei wird ein Wohngebäude mit erhöhter Nachtlüftung ($n = 2 \text{ h}^{-1}$), einem g-Wert von 0,6 und einem variablen Sonnenschutz mit einem F_c -Wert von 0,75 betrachtet.

Die Steuerung des Sonnenschutzes erfolgt analog zu den Randbedingungen der Norm. Das Wärmeschutz-

niveau der Außenbauteile entspricht der EnEV 2014 (Bundesregierung (Hg.) 2015). Die Speichermasse der Innen- und Außenbauteile ist so gewählt, dass sich für die betrachtete Gebäudezone eine mittelschwere Bauart ergibt.

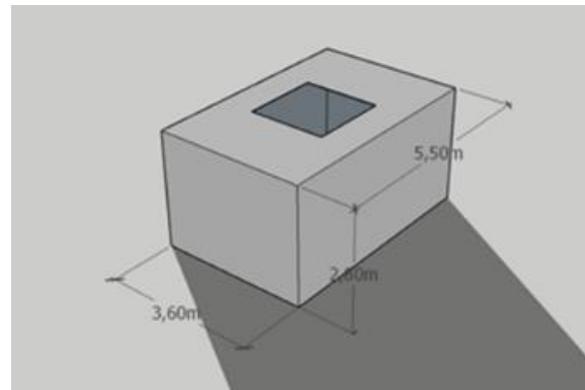


Abbildung 2: Raummmodell in Anlehnung an DIN EN ISO 13792:2012-08

Für alle vom DWD für das Bundesgebiet bereitgestellten 333.313 TRY-Datensätze werden jeweils für 2015 als auch für 2045 die Gh26-Werte berechnet. Um einen Vergleich zwischen unterschiedlichen Klimadatensätzen anstellen zu können, ist die Anwendung eines einheitlichen Kriteriums zur Festlegung von Sommerklimaregionen sinnvoll.

Daher werden die Ergebnisse zunächst deskriptiv statistisch untersucht, um ein Bewertungs- und Unterscheidungskriterium für Sommerklimaregionen zu bilden. Erwartungsgemäß ergibt sich eine große Bandbreite an Gh26-Werten für Deutschland, die sich wie in den in Abbildung 3 dargestellten Histogrammen verteilt. Die Ergebnisse wurden zunächst mit Unterscheidung zwischen verschiedenen Gh26-Quantilwerten verglichen. Die Häufigkeitsverteilung der Ergebnisse weist eine auffallende Nähe zur Normalverteilung auf. Als ein mögliches Unterscheidungskriterium für Sommerklimaregionen bieten sich die Standardabweichungen der ermittelten Grundgesamtheiten an.

Im Ergebnis zeigt sich bei einer Unterscheidung der Ergebnisse mittels Standardabweichung in drei Klimaregionen die höchste Annäherung in Anlehnung an die Sommerklimaregionen der DIN 4108-02:2013-02. Um einen Bezug zur bestehenden Bewertung der Sommerklimaregionen gemäß Norm herstellen zu können, wurde dieses Unterscheidungskriterium mittels Standardabweichung in drei Klimaregionen gewählt. Die sich somit ergebenden Verteilungen und Ergebnisse sind in den Abbildungen 3 und 4 dargestellt.

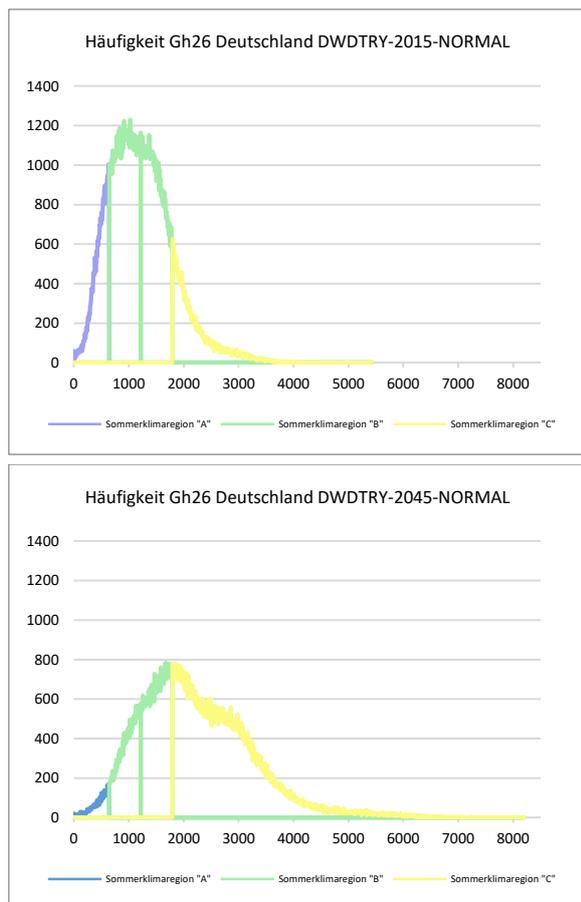


Abbildung 3: Häufigkeitsverteilungen Gh26-Werte in Deutschland für mittlere TRY 2015 (oben) und 2045 (unten)

Für weitere Unterscheidungen wird ausschließlich die Datenbasis der TRY 2015 mit dem Mittelwert der Ergebnisse von 1219 Kh, der Standardabweichung von 574 Kh, dem Minimalwert von 0 Kh und dem Maximalwert von 5424 Kh gewählt. A (kühl) zwischen 0 und 645 Kh, B zwischen 645 und 1793 Kh (Sigmaumgebung) und C (warm) bei Werten über 1793 Kh.

Die Farbgebung der dargestellten Bereiche in Abbildung 3 und 4 ist analog zur DIN 4108-02:2013-02 nach zuvor genannten Kriterien gewählt: Blau Region A, Grün B und Gelb C (von kühler nach wärmer).

In Abbildung 4 ist oben die Aufteilung der Ergebnisse für das TRY 2015 zu sehen. Unten sind die Ergebnisse für die Berechnungen mit dem TRY 2045 und der Standardabweichung aus den 2015er Daten dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass mit fortschreitendem Klimawandel, welcher in den TRY 2045 bereits berücksichtigt ist, warme Klimaregionen C deutlich an Fläche zunehmen und dass kühle Klimaregionen A nur noch vereinzelt in Höhenlagen, wie beispielsweise dem Alpenvorland auftreten.

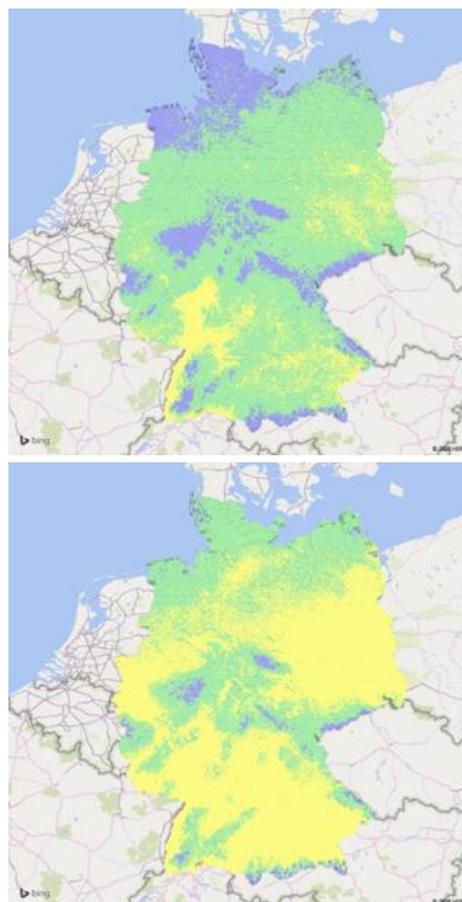


Abbildung 4: Ergebnisse der TRY 2015 (oben) und 2045 (unten) Simulationen mit Aufteilung der Gh26-Werte über die Standardabweichung der Grundgesamtheit TRY 2015

Bei näherer Betrachtung der Abbildung 4 oben ergibt sich z. B. für Berlin, vor allem für die Region um das Stadtzentrum, überwiegend ein wärmeres Klima in Region C. Nach Klimakarte der DIN 4108-02:2013-02 ist die Stadt der Region B zugeordnet. An dieser Stelle zeigen sich stadtklimatische Erkenntnisse, die aus der Anwendung der ortsgenauen Klimadaten resultieren.

FAZIT UND AUSBLICK

Vor dem Hintergrund einer zu beobachtenden globalen Klimaveränderung werden die Herausforderungen der Temperaturbegrenzungen in Gebäuden künftig noch anspruchsvoller. Grundsätzlich ergeben sich für die verschiedenen Testreferenzjahre unterschiedliche Situationen. Bei einer Betrachtung der TRY 2015 stellt sich die Situation näherungsweise unverändert im Vergleich zur bisherigen Bewertung in der Nachweisführung mit den TRY 2011 dar. Hingegen ist bei einer zukünftigen Bewertung mit den TRY 2045 ein deutlicher Temperaturanstieg zu erwarten. Insbesondere im urbanen Raum werden sommerklimatische Einflüsse durch Siedlungsstrukturen verstärkt und dort sind, bedingt durch eine hohe Stadtbevölkerung, besonders viele Menschen von den negativen Folgen des Klimawandels betroffen.

Es ergibt sich die grundsätzliche Frage, ob eine Bewertung gemäß bisheriger Vorgehensweise – also die Verwendung von Klimadaten aus der Vergangenheit – oder für die Zukunft prognostizierter Klimadaten sinnvoll ist. Nicht zuletzt die Tatsache, dass einzelne gemessene Klimadaten (hier dargestellt Kassel 1997 und 2018) sogar höhere Übertemperaturgradstunden der Außenlufttemperaturen aufweisen als der extreme Sommer des prognostizierten Testreferenzjahres 2045, werfen Fragen nach geeigneten Randbedingungen und Anforderungen sowie einem geeigneten Maßstab zur Bewertung sommerlicher Raum- und Gebäudeüberhitzung auf.

Bei Neubauvorhaben sollten bereits jetzt die ortsgenauen Testreferenzjahre 2015 zur Anwendung kommen – insbesondere um die Effekte des Stadtklimas zu berücksichtigen. Darüber hinaus sollten zumindest in einer Beratungsvariante die Effekte des Klimawandels durch Verwendung der Zukunfts-TRY-Daten aufgezeigt werden. Beim Nachrüsten von Verschattungseinrichtungen und weiteren Maßnahmen zur Begrenzung von Übertemperaturen bei Bestandsgebäuden sollten möglichst die normativen Anforderungen (für Neubauten) berücksichtigt werden – auch wenn die praktische Ausführung oftmals mit einem hohen Aufwand verbunden ist.

Die durchgeführten Untersuchungen stellen deutschlandweit zunächst einen relativen Unterschied im Klimawandel dar. Zur baulichen Bewertung von zukünftigen Überhitzungen sind weitere, realistischere Raumkonfigurationen zu untersuchen.

Für weitere Standorte sind Temperaturmessreihen mit den Daten des DWD abzugleichen, um zu prüfen, wie sich in anderen Regionen die klimatischen Situationen im Vergleich zu den DWD TRY ergeben.

Darüber hinaus sind weiterführende Fragestellungen an den thermischen Komfort im Sommer zu beantworten. Um ohne gravierende bauliche Veränderungen ein heute übliches Komfortniveau auch zukünftig einhalten zu können, werden voraussichtlich deutlich häufiger als heute Maßnahmen zur Kühlung sowohl bei Nichtwohngebäuden als auch bei Wohngebäuden erforderlich sein.

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag werden die Auswirkungen von klimatologischen Veränderungen auf Gebäude mit Anwendung der DWD Testreferenzjahre 2015 und 2045 analysiert. Zunächst werden klimatologische Messdaten am Standort Kassel mit den DWD TRY verglichen und beurteilt. Anknüpfend werden thermisch-dynamische Simulationen mit den neuen

TRY durchgeführt. Erstmals werden Klimadaten mit einer räumlichen Auflösung von 1 km² mit entsprechendem Rechenaufwand im Rahmen von über 600.000 Jahressimulationen verwendet. Im Ergebnis werden relative Differenzen der Betrachtungszeiträume dargestellt und miteinander verglichen.

Die Untersuchungen bilden eine Grundlage für weitergehende Analysen von Klimadaten und deren Verwendung bei der Planung des sommerlichen Wärmeschutzes von Gebäuden.

DANKSAGUNGEN

Wir danken dem Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie und dem Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik für die Bereitstellung der zur Vervollständigung genutzten externen Klimadaten.

LITERATUR

- Borsch-Laaks (2011): Sommerkomfort planen: Nachweis nach dem Passivhaus-Projektierungspaket. Hg. v. 4. Europäischer Kongress für energieeffizientes Bauen mit Holz.
- Bundesregierung (Hg.) (2015): Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV). Energieeinsparverordnung vom 24. Juli 2007 (BGBl. I S. 1519), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 24. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1789) geändert worden ist.
- Deutscher Wetterdienst (Hg.) (2016): Projektbericht. Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse.
- Deutscher Wetterdienst (Hg.) (2017): Handbuch. Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse.
- DIN 4108-2 2003-07 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden.
- DIN 4108-2 2013-02 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden.
- DIN EN ISO 13790 2008-09 Energieeffizienz von Gebäuden – Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung (ISO 13790:2008); Deutsche Fassung EN ISO 13790:2008.
- DIN EN ISO 13791 Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik – Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren (ISO 13791:2012); Deutsche Fassung EN ISO 13791:2012.

- DIN EN ISO 13792 2012-08 Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung von sommerlichen Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik – Vereinfachtes Berechnungsverfahren (ISO 13792:2012); Deutsche Fassung EN ISO 13792:2012 Deutsche Fassung EN ISO 13792:2012.
- Fitzner (2013): Leistungsfähigkeit bei unterschiedlichen Raumtemperaturen. Diskussionsbeitrag zur HESO-Studie (Projekt F 2039). In: KI Kälte · Luft · Klimatechnik (05-2013), S. 20–26.
- Hauser; Kempkes; Schlitzberger (2006): Vergleichende Untersuchungen von Standard-Klimadatensätzen (Testreferenzjahren) mit gemessenen Langzeit-Klimadatensätzen für den Standort Kassel. In: Bauphysik 28 (4), S. 221–232.
- Hauser, G. (1977): Rechnerische Vorherbestimmung des Wärmeverhaltens großer Bauten. Dissertation. Hg. v. Universität Stuttgart.
- Hauser, Gerd (1978): Method for calculating of thermal behaviour of buildings. Proceedings ICHMT-Seminar. Hg. v. Hemisphere Publishing Comp. Washington.
- Hellwig; Nöske; Brasche; Gebhardt; Levchuk; Bischof (2012): Bericht "Hitzebeanspruchung und Leistungsfähigkeit in Büroräumen bei erhöhten Außentemperaturen". Projekt F 2039.
- K. Friedrich; F. Kaspar (2019): Rückblick auf das Jahr 2018. Deutscher Wetterdienst Abteilung Klimaüberwachung.
- Kehl (2010): Sommerliches Komfortklima. Plan- und nachweisbar?! Hg. v. Holzbautag Biel.
- Kommission Innenraumlufthygiene (Hg.) (2019): Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Luftqualität in Innenräumen. Stellungnahme der Kommission Innenraumlufthygiene (IRK) am Umweltbundesamt. Bekanntmachung des Umweltbundesamtes. In: Bundesgesundheitsblatt (62), S. 232–234. DOI: 10.1007/s00103-018-2870-4.
- Lam; Hiller (Hg.) (2014): Schwierigkeiten bei der Verwendung der TRY Daten 2011 für Deutschland in der thermischen Simulation. BauSIM. Aachen.
- Petzold (1983): Raumlufthtemperatur. 2., stark bearb. Aufl.
- Rouvel (2000): Sommerlicher Waermeschutz. In: Bauphysik 22 (5), S. 321–324.
- Schlitzberger (2014): Anpassung und Entwicklung von Planungswerkzeugen für den sommerlichen Mindestwärmeschutz und zur Komfortbewertung des Sommerfalls. Kassel.
- Webs; Deuschländer; Christoffer (2004): Klimastatusbericht 2004. Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse TRY, S. 199–204.

SIMULATIONSSZENARIEN FÜR GEBÄUDEENERGIESIMULATION IN FRÜHEN PLANUNGSPHASEN

E. Eckstädt¹, A. Paepcke², A. Hentschel³, A. Schneider¹, A. Nicolai² und F. Schumann⁴

¹Fraunhofer IIS/EAS, Dresden, Deutschland

²Institut für Bauklimatik, TU Dresden, Dresden, Deutschland

³EA Systems Dresden, Dresden, Deutschland

⁴Innius GTD, Dresden, Deutschland

KURZFASSUNG

Der vorliegende Beitrag widmet sich der intensiven Analyse des Gebäudeplanungsprozesses nach deutschen Richtlinien für die Gewerke Architektur, Bauphysik, Heizung, Lüftung, Kälte und Gebäudeautomation. Ziel ist es herauszuarbeiten, wie die Gebäudesimulation einen Beitrag leisten kann, die Planungsqualität zu erhöhen. Aus der Analyse ergeben sich sechs Simulationsszenarien, welche durch unterschiedliche Fragestellungen und Datenverfügbarkeit gekennzeichnet sind. Diese Szenarien bilden den Ausgangspunkt für künftige Untersuchungen, bei denen verfügbare Softwarewerkzeuge evaluiert werden sollen um Potenziale zu identifizieren, welche einen Einsatz dieser Tools in der Praxis ermöglichen.

ABSTRACT

The present paper is dedicated to the intensive analysis of the building planning process according to German guidelines for architecture, building physics, heating, ventilation, cooling and building automation. The goal is to investigate how building simulation can contribute to improve the quality of planning. The analysis results in six simulation scenarios, which are characterized by different questions and data availability. These scenarios form the starting point for future investigations in which available software tools are to be evaluated in order to identify potentials that enable these tools to be used in practice.

EINFÜHRUNG

Die Gebäude- und Anlagensimulation kann einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden leisten, sofern ihre Möglichkeiten rechtzeitig im Planungsprozess berücksichtigt und genutzt werden. Momentan bestehen hier erhebliche Hürden. Einerseits gibt es Barrieren in Verbindung mit traditionellen Planungsmethoden und andererseits ist der für die Simulation erforderliche Modellierungsaufwand oft noch zu hoch. Durch den aktuell zu beobachtenden Trend zur Digitalisierung der Planungsprozesse – bekannt unter dem Schlagwort BIM (Building Information Modeling) – besteht jedoch großes Potenzial, die Simulation von Anfang an in den Planungsprozess einzubeziehen. Der Planungsprozess in Deutschland ist auf der Basis der „Honorarordnung für Architekten und Ingenieure“ (HOAI, 2013) umfassend standardisiert, was die Ergebnisse und Kosten angeht. Dadurch ergeben sich entscheidende Randbedingungen für eine mögliche Einbindung von Simulationen.

Es existiert eine Vielzahl an Vorarbeiten im Bereich Gebäude- und Anlagensimulation und zu deren Kopplung mit BIM. Beispielhaft seien hier die Ergebnisse der Projekte *Annex 60* (Wetter & van Treeck, 2017) und *EnEffBIM* (van Treeck, 2017) genannt. Diese Arbeiten haben vorrangig technologische Hürden adressiert.

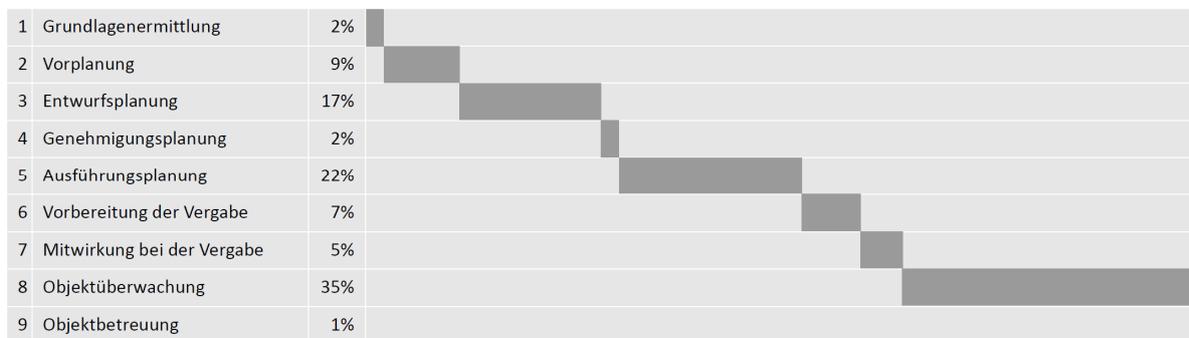


Abbildung 1: Leistungsphasen nach HOAI mit ihrem Honoraranteil für das Leistungsbild „Technische Ausrüstung“ (im Leistungsbild „Gebäude und Innenräume“ sind die Prozentpunkte ähnlich)

Dieser Artikel zeigt Wege auf, vorhandene Digitalisierungsansätze mit den Strukturen der HOAI zu vereinbaren. Dazu erfolgt die Ableitung von Szenarien basierend auf einer gründlichen Analyse des Planungsprozesses.

ANALYSE DES AKTUELLEN GEBÄUDEPLANUNGSPROZESSES

Akteure

Der Bauherr definiert grundsätzlich die Anforderungen an das Gebäude. Dabei hat er gegebenenfalls Anforderungen seitens Finanzierung/Bank/Fördermittelgeber oder zukünftiger Nutzer beispielsweise hinsichtlich eines zu erreichenden Energieniveaus zu berücksichtigen. In diesem Beitrag stehen die Planungsdisziplinen, die den Energieverbrauch der Gebäude wesentlich bestimmen, im Fokus: die Architektur- und die Fachplanung für die Gewerke Heizung (inkl. Trinkwarmwasserbereitung), Kälte und Lüftung mit der zugehörigen Gebäudeautomation. Akteure wie zum Beispiel Baufirmen, die erst nach Ende der zeitigen Planungsphasen aktiv werden, werden hier nicht berücksichtigt.

Der Architekt nimmt innerhalb des Planer-Teams eine Sonderrolle ein, da er neben der architektonischen Fachplanung auch die Aufgabe hat, die anderen Planungsbeteiligten zu koordinieren. Dies sind in der Regel mindestens die Fachplaner für Tragwerk und Technische Gebäudeausrüstung. Je nach Projektgröße können weitere Spezialisten im Planungsteam beteiligt sein: Bauphysik, Brandschutz, Lichtplaner, etc.

Außerhalb von Planungsteam und Bauherrenseite sind Behörden, Prüfsachverständige und Zertifizierungseinrichtungen relevante Akteure.

Phasen der HOAI

Die „Honorarordnung für Architekten und Ingenieure HOAI“ (HOAI, 2013) gliedert den Planungs- und Errichtungsprozess von Gebäuden in neun aufeinander aufbauende Leistungsphasen. Das Projektmanagement von Bauprojekten folgt dem klassischen Wasserfallmodell: Die Ergebnisse vorhergehender Projektphasen sind Ausgangspunkt für jeweils folgende Phasen. *Abbildung zeigt die Leistungsphasen in ihrer Abfolge und mit ihrem nach HOAI für das Leistungsbild „Technische Ausrüstung“ vorgesehenen Honoraranteil. Dieser kann zunächst als Indikator für den Aufwand in den einzelnen Planungsphasen bei klassischem Projektablauf dienen. Der Fokus der folgenden Betrachtungen liegt auf den Leistungsphasen 1 bis 5. Ab Leistungsphase 6 treten konzeptuell technische Fragestellungen in den Hintergrund und der Fokus verschiebt sich zu organisatorischen und praktisch technischen Fragestellungen. Erst in der nächsten Gebäudelebensphase „Nutzung“ gibt es wieder sinnvolle Anwendungsfälle für die Gebäude- und Anlagensimulation. Diese werden in diesem Beitrag jedoch nicht betrachtet.*

Die HOAI regelt für verschiedene Projektbeteiligte (Architekt, Tragwerksplaner, Planer für technische Gebäudeausrüstung) die Grund- und Sonderleistungen in den einzelnen Leistungsphasen. Für die Technische Gebäudeausrüstung (TGA) nimmt die VDI 6026 „Dokumentation in der Technischen Gebäudeausrüstung“ (VDI 6026-1, 2008) noch Detaillierungen vor. Die demnach zu klärenden Fragestellungen, durchzuführende Berechnungen und zu liefernde Unterlagen werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

Architektur in den Leistungsphasen 1 bis 5

Die Objektplanung muss der Fachplanung in der Regel geringfügig vorauslaufen, da sie die Rahmenbedingungen für die Fachplanung setzt. Jedoch handelt es sich nicht ausschließlich um eine einseitige Vorgabe, vielmehr bedingen Planungsergebnisse von TGA und Tragwerk regelmäßige Anpassungen in der Objektplanung.

Am Ende jeder Planungsphase wird dem Bauherrn eine konsistente Gebäudeplanung aller beteiligten Fachdisziplinen übergeben. Diese beinhaltet jeweils auch eine Fortschreibung der Kostenplanung. Der Abgleich mit den Anforderungen des Bauherrn und des Baurechts ist ebenfalls eine kontinuierliche phasenübergreifende Aufgabe.

In der Grundlagenermittlung erfolgt in Zusammenarbeit des Architekten mit dem Bauherrn die Ausarbeitung der Randbedingungen für das zukünftige Bauvorhaben. In Abhängigkeit der Komplexität der ausgearbeiteten Randbedingungen sind eventuell weitere Fachplaner notwendig. Hierbei sind schon erste Geometrie-Ideen (Kubatur) und Nutzungsflächen verfügbar. Nur bei Bestandsgebäuden liegen mitunter detaillierte Informationen zur Materialität, zum Tragwerk oder Ähnliches bereit.

In der Vorplanung liefert der Architekt bereits erste Skizzen und Zeichnungen in typischen Maßstäben 1:500 - 1:200 und ggf. auch Modelle an den Bauherrn. Des Weiteren ist es die Aufgabe des Architekten, in Abstimmung mit Behörden und Ämtern die Realisierung des Entwurfes vorzubereiten. Am Ende der Leistungsphase 2 sind Lösungen für die wesentlichen städtebaulichen, gestalterischen, funktionalen, technischen, bauphysikalischen, wirtschaftlichen, energiewirtschaftlichen und landschaftsökologischen Fragen erarbeitet. Eine grobe Aufteilung der Flächen für die einzelnen Nutzungen und ein Konzept zur Fassade werden festgelegt. Anhand der ausgearbeiteten Lösungen wird die Kostenabschätzung und ein Terminplan für Planungs- und Bauablauf an den Bauherrn übergeben.

In der Entwurfsplanung wird die Vorplanung fortgeschrieben. Detaillierte Schnittzeichnungen, Grundrisse und Ansichten, in der Regel im Maßstab 1:100, werden angefertigt. Des Weiteren erfolgen die Kostenberechnung und die Fortschreibung des Terminplans. Die Raumaufteilung und

Fassadengestaltung stehen am Ende dieser dritten Leistungsphase fest.

In der Genehmigungsplanung werden die Vorlagen und Nachweise für öffentlich-rechtliche Genehmigungen zusammengestellt und die notwendigen Verhandlungen durchgeführt. Ggf. erfolgt eine geringfügige Anpassung der Planung.

In der Ausführungsplanung erfolgt eine weitere Detaillierung des Entwurfs. Insbesondere werden ausführungsrelevante Details erarbeitet und die Gewerke-orientierte Bearbeitung während der Bauausführung berücksichtigt.

Heizung, Kälte, Lüftung und zugehörige Gebäudeautomation in den Leistungsphasen 1 bis 5

In der Grundlagenermittlung erfolgt die Abstimmung der Nutzungsvorgaben für verschiedene Bereiche mit dem Bauherrn:

- Nutzungszeiten, Wochentage,
- Solltemperaturen (Begrenzung nur nach unten, oder auch nach oben – besteht Kühlanforderung?),
- Anforderungen an die Frischluftversorgung (Fensterlüftung, maschinelle Lüftung),
- Anforderungen an die Raumluftfeuchte,
- innere Lasten (thermische Lasten wie Licht und elektrische Verbraucher, Feuchtelasten wie Personen oder Produktionsprozesse).

Weiterhin wird ermittelt, welche Energieträger zur Versorgung zur Verfügung stehen. Es erfolgt eine erste Abschätzung zum Primärenergieeinsatz anhand von Flächenansätzen.

In der Vorplanung erfolgt eine überschlägige Ermittlung der Bedarfe:

- Heiz- und Kühllast von Räumen und wesentlicher Anlagentechnik wie Raumlufttechnik (RLT), Trinkwarmwasserbereitung (TWB),
- Wasserverbrauch (Qualität, warm/kalt),
- Luftwechsel, Volumenströme,
- Befeuchtungsleistungen und
- Elektroenergiebedarf.

Es erfolgen anschließend Variantenbetrachtungen zur Deckung dieser Bedarfe. Für die Vorzugsvariante erfolgt die Grobbemessung der wesentlichen Komponenten (Wärmeerzeuger, Lüftungsgeräte, Kältemaschinen, Pumpen, Raumübergabeeinheiten) hinsichtlich Anschlussleistung, Flächenbedarf und Verbrauchskosten und die Kostenschätzung nach DIN 276 „Kosten im Bauwesen“ (DIN 276, 2018).

Sobald die Versorgungskonzepte feststehen und die Objektplanung hinreichend fortgeschritten ist, können die wesentlichen Berechnungen nun in der Entwurfsplanung erfolgen. Dazu gehören

- Lastberechnung für Heizung, Kühlung, Trinkwassererwärmung raumweise und als Gebäudebilanz,
- ggf. Thermische und/oder Strömungssimulation für ausgewählte Bereiche,
- Luftmengenberechnungen,
- Rohrnetzberechnungen,
- Druckverlustberechnung Kanalnetz.

Basierend auf den Berechnungsergebnissen erfolgt die Dimensionierung der wesentlichen Komponenten:

- Raumübergabe (freie Heiz-/Kühlflächen, bauteilintegrierte Heizung/Kühlung, Luftdurchlässe),
- Speicher, Behälter,
- Wärmetauscher, Pumpen, Rohrleitungen,
- Wärme- und Kälteerzeuger, Rückkühler, Wärmequellen,
- Kanäle, Schalldämpfer,
- Lüftungsregistern, Ventilatoren und Wärmerückgewinnungssystemen.

Basierend auf den Konzeptentscheidungen der Fachgewerke erfolgt die Erstellung der Regelschemata der Gebäudeautomation, die Erstellung der Datenpunktlisten und die Auslegung der Regelarmaturen.

Die Kostenplanung wird fortgeschrieben und eine Kostenberechnung nach DIN 276 (DIN 276, 2018) erstellt.

In der Genehmigungsplanung sind seitens der TGA Zuarbeiten auf Basis der Entwurfsplanung für öffentlich-rechtliche Genehmigungen zu erbringen:

- Brandschutzkonzept,
- Immissionsschutzrechtliche Genehmigung,
- EnEV-Nachweis (EnEV, 2016) mit Einhaltung der Anforderung nach dem EEWärmeG (EEWärmeG, 2015), zum sommerlicher Wärmeschutz (DIN 4108-2, 2013) und dem Primärenergieverbrauch nach DIN V 18599 (DIN V 18599, 2018).

In der Ausführungsplanung wird der Entwurf geprüft und fortgeschrieben. Es wird eine vollständige Berechnung und Dimensionierung aller Komponenten durchgeführt. Der Entwurf wird durch vertiefte Koordination in eine ausführungsreifen Planungslösung überführt. Es erfolgt insbesondere eine terminliche Koordination mit den anderen Planungsbeteiligten und die technische Koordination wird fortgeführt.

Bauphysik

Das Leistungsbild „Beratung zur Bauphysik“ umfasst nach HOAI die Betrachtung der Themen

- Wärmeschutz,
- Energiebilanzierung,
- Bauakustik (Schallschutz) und Raumakustik.

Das Leistungsbild bildet somit eine Gelenkfunktion zwischen Objektplanung und TGA.

Dies beinhaltet in der Vorplanung die bauphysikalische Vordimensionierung der relevanten Bauteile des Gebäudes und das Erstellen eines Gesamtkonzeptes in Abstimmung mit der Objektplanung und den Fachplanungen. Die Mitwirkung beim Abstimmen der fachspezifischen Planungskonzepte der Objektplanung und der Fachplanungen ist explizit Teil der Leistung. Das Erstellen von Rechenmodellen und das Auflisten der wesentlichen Kennwerte als Arbeitsgrundlage für Objektplanung und Fachplanungen sind als Methode vorgeschrieben.

In der Entwurfsplanung werden die Rechenmodelle und darauf basierend die Planungskonzepte fortgeschrieben. Es werden in dieser Phase alle Bauteile bauphysikalisch dimensioniert.

In der Genehmigungsplanung werden die förmlichen Nachweise erstellt. In der Ausführungsplanung erfolgt eine Ergänzung und Fortschreibung.

Die Honoraranteile in diesem Leistungsbild sind ggü. denen der Objekt- und Fachplanung deutlich in Richtung der zeitigen Planungsphasen verschoben.

BIM-Unterstützung in der Planung

Mit *Building Information Modeling* (BIM) wird eine Methode für Planung, Errichtung und Betrieb von Gebäuden bezeichnet, welche auf softwaregestützter Informationshaltung und -verarbeitung basiert. BIM kann somit als Synonym für die Digitalisierung des Bauwesens betrachtet werden. Die Methode ist softwareunabhängig, jedoch sind mit IFC (ISO 16739, 2018) und BCF (buildingSMART International, 2020) Dateiformate für die Zusammenarbeit standardisiert.

Der vorher beschriebene Planungsprozess ist zunächst methodenunabhängig, wird aber seit Jahren zunehmend BIM-basiert realisiert.

Je nach BIM-Reifegrad im einzelnen Projekt beinhaltet dies

- die Arbeit mit 3D-Modellen, welche neben der Geometrie zusätzliche Informationen („Attribute“) enthalten,
- die Arbeit in einer gemeinsamen Datenumgebung und
- die Arbeit mit standardisierten Prozessen.

Aufgrund dessen ergeben sich zahlreiche Möglichkeiten, den Planungsprozess effizienter zu gestalten und/oder die Planungsqualität zu erhöhen. Allerdings geht dies in der Regel mit der Verschiebung von Planungsaufwand zwischen den Akteuren und Phasen einher. Der Ausschuss der Architekten und Ingenieure für die Honorarordnung thematisiert die Umstellung auf BIM-basiertes Arbeiten in seinem 2019 erschienenen Heft Nr. 11 (AHO e.V., 2019): Es werden Modelldetailierungsgrade (MDG) für die einzelnen Leistungsphasen definiert. Für Details wird auf die projektspezifischen Auftraggeber-Informations-

Anforderungen (AIA) verwiesen. Zahlreiche BIM-Leistungen werden vom Ausschuss nicht als Grund-, sondern als besondere Leistung eingestuft.

An die Stelle der verschiedenen Planungsmaßstäbe, die in den vorherigen Abschnitten teilweise genannt wurden, treten bei der BIM-basierten Arbeit *Level of Detail* bzw. *MDG*.

Das Grundcharakteristikum eines BIM-Planungsprozesses ist, dass Informationen zunehmend maschinenlesbar abgelegt werden, dadurch ergeben sich zahlreiche Verbesserungsmöglichkeiten, darunter eine effizientere Einbindung von Simulationen in den Planungsprozess.

Simulationsunterstützung in der Planung

Der oben beschriebene Planungsprozess nach HOAI ist unabhängig von einer konkret gewählten Methodik. Simulationen sind im Planungsprozess der vorher beschriebenen Gewerke nicht zwingend vorgeschrieben. Häufig ist in den einschlägigen Normen ein statisches Berechnungsverfahren für die Dimensionierung von Komponenten festgelegt. Eine Ausnahme bildet die Kühllastberechnung, für die in (VDI 2078, 2015) ein dynamisches Simulationsverfahren vorgeschrieben ist. Für den Nachweis zum sommerlichen Wärmeschutz nach (DIN 4108-2, 2013) ist ein Simulationsverfahren als Alternativvariante beschrieben. Für viele Berechnungen existieren keine normierten Verfahren. Es liegt somit in der Verantwortung des Planers, ein geeignetes Verfahren zur Anwendung zu bringen. Ein Simulationsverfahren anstelle einer statischen Berechnung ist in der Regel dann sinnvoll,

- wenn die statischen Berechnungsverfahren starke Vereinfachungen enthalten, die zu einer nennenswerten Überdimensionierung von Anlagen führen. Damit einhergehen erhöhte Investitions- und Betriebskosten. Dies trifft beispielweise für die Heizlastberechnung zur Auslegung der zentralen Erzeuger und die Auslegung von Lüftungsregistern zu.
- wenn die statischen Berechnungsverfahren so starke Vereinfachungen enthalten, dass die Bewertung bestimmter Effekte gar nicht erfolgen kann: beispielsweise Nachtabsenkung von Soll- und Vorlauftemperaturen, effizientere Beleuchtung und Ausstattungsgegenstände, Einsatz geregelter Pumpen.
- wenn die betrachteten Geometrien sehr unregelmäßig sind und damit die den genormten Verfahren zugrundeliegenden Vereinfachungen ihre Gültigkeit verlieren. Dies kann zur Nichteinhaltung der angestrebten Behaglichkeit führen.
- wenn eine Wiederverwendung der Simulationsmodelle für weitere Aufgabenstellungen erfolgt, so dass sich der hohe Aufwand in der Modellerstellung lohnt.

Tabelle 1: Charakterisierung der Szenarien nach Anwendungszweck

SZENARIO	AUSZUWERTENDE KRITERIEN	VARIABLE GRÖSSEN
I Architekturentwurf (ARC bis LP2)	Summe aller Zonenlasten	Ausrichtung, Kubatur, Fensteranteil und -lage, Bauschwere;
II Gebäude als Verbraucher (ARC LP3)	Heiz- und Kühllast in den einzelnen Räumen Summe aller Zonenlasten	„Rutschung“ der Nutzungszonen innerhalb Gebäude Rückmeldung bzgl. Bauphysik (z.B. Sommerlicher Wärmeschutz, Schichtaufbau) Verschattungsanforderungen Nutzungsanforderungen
III Variantenstudie Anlagentechnik (TGA LP2)	Sekundär- und Primärenergiebedarf (oder sonstige KPI) des Gebäudes oder spezieller Anlagenteile (z.B. RLT, TWB)	Anlagentechnik
IV Leistungsmäßig begrenzte Anlagentechnik (TGA LP3, ARC LP3)	Einzelne Zonen: Behaglichkeit Einhaltung der Nutzungsanforderungen Sommerlicher Wärmeschutz	Verteilung des Mangels
Va Raumübergabeanlage Detailbetrachtung nur RLT (TGA LP3, EnEV-Nachweis)	Einzelne Zonen: Behaglichkeit Einhaltung der Nutzungsanforderungen Summe aller Zonenlasten	Zulufttemperaturen Auslegung der Zonenheizelemente
Vb Raumübergabeanlage Detailbetrachtung auch wasserseitig (TGA LP3)	Einzelne Zonen: Behaglichkeit Einhaltung der Nutzungsanforderungen	Vorlauftemperaturen (konstant/geregelt)
VI Erzeugungsanlage Detailbetrachtung (TGA LP3)	Sekundär- und Primärenergiebedarf (oder sonstige KPI) des Gebäudes	Vorlauftemperaturen (konstant/geregelt)

Neben den klassischen Anforderungen an ein Bauwerk kann der Bauherr eine Zertifizierung des Gebäudes anstreben, dadurch ergeben sich erhöhte Planungsanforderungen, welchen häufig mit dem Einsatz von Simulationsmethoden im Planungsprozess begegnet wird. Im Kontext der Gebäudeenergiesimulation sind vorrangig relevant:

- KfW: Nachweis Primärenergieverbrauch und Dämmung der Gebäudehülle,
- Nachhaltigkeitszertifizierungen wie z.B. DGNB und LEED: Bewertung von 37 Kriterien aus den Bereichen ökologische, ökonomische, funktionelle, technische Qualität, sowie Prozess- und Standortqualität, darunter: Einsatz passiver Systeme für die Gebäudekonditionierung, Lebenszykluskosten, thermischer Komfort, Qualität der Gebäudehülle etc.
- Passivhausstandard: Nachweis von Primärenergieverbrauch, Energiekennwerten für Heizen und Kühlen, sowie Luftdichtheit. Der formale Nachweis ist allerdings nur mit dem Passivhausplanungspaket möglich.

Allen vorher beschriebenen Simulationen liegt in der Regel die Betrachtung des Gebäudesystems als Energieumwandlungskette zugrunde. Ausgehend von den Nutzungsanforderungen an das Gebäude und der Bauphysik erfolgt eine verlustbehaftete Energieumwandlung entlang der Kettenglieder

- Übergabe,
- Verteilung,
- Speicherung,
- Erzeugung.

Basierend auf dem Sekundärenergieverbrauch der Erzeugung werden anschließend verschiedene Key Performance Indikatoren (KPI) ermittelt: z.B. Primärenergieverbrauch, verbrauchsgebundene Kosten, CO₂-Emissionen.

Verbesserungen im Planungsprozess

Ein durchgängig durch BIM und Simulation unterstützter Planungsprozess bietet den Vorteil einer effizienten und fehlerreduzierten Arbeitsweise mit verbesserter Planungsqualität. Für beide Aspekte sind zum Einsatz in der breiteren Masse noch organisatorische und technische Hürden zu überwinden. BIM-gestützte Prozessketten existieren bereits in der Planungspraxis, siehe zum Beispiel (Vogel & Schönemann, 2017). Diese sind jedoch weder vereinheitlicht, noch finden sie flächendeckend Einsatz. Insbesondere von Seiten der Architekturbüros wird eine eher geringe Nachfrage nach Simulationsinstrumenten beobachtet (Hausknecht & Liebich, 2016). Die Gebäudesimulation sollte allerdings, aufgrund der großen Menge benötigter und erzeugter Daten, nicht ohne BIM betrachtet werden.

Tabelle 2: Anforderung an die Modelle in den Szenarien

SZENARIO	NUTZUNG	BAUPHYSIK	ÜBERGABE	VERTEILUNG	SPEICHER & ERZEUGUNG
I	konstanter Ansatz über Flächenanteil nur Unterscheidung in beheizt/mäßig beheizt/unbeheizt	Geometrie mit grober Zonierung innen Wände schichtweise Fenster ggf. mit Sonnenschutz	ideal		
II	Raumweiser Ansatz mit Zeitplänen gemäß DIN V 18599-10	Wie I, aber detailliertere Zonierung innen	Ideal		
III	Datenkopplung Nutzung+Bauphysik		ideal		lastabhängig
IV	ggf. Anpassung Anforderungen	siehe II	ideal	Geregelt	mit Leistungsbegrenzung
Va	siehe II	siehe II	Raumübergabe wasserseitig ideal (temperaturunabhängig), aber Zulufttemperatur wird berücksichtigt.	Ideal	
Vb			Raumübergabe wasser- und luftseitig temperaturabhängig		
VI	siehe II	siehe II	Raumübergabe wasser- und luftseitig temperaturabhängig		temperaturabhängig

ABLEITUNG VON SIMULATIONSSZENARIEN

Basierend auf den oben genannten Ausführungen ergeben sich verschiedene Fragestellungen an die Simulation und an die unterschiedliche Datenverfügbarkeit in den Planungsphasen. Daher gibt es nach Meinung der Autoren nicht *einen* Simulationsworkflow für *alle* Fälle, stattdessen sollten die unterschiedlichen Charakteristiken berücksichtigt werden. Insbesondere verlangen nicht konzipierte oder dimensionierte Gebäude- und Anlagenteile in den unterschiedlichen Planungsphasen Idealisierungsannahmen, die in einem späteren Planungsschritt unter Kenntnis der konkreten Systeme korrigiert werden. Dabei erfolgen Detailbetrachtungen für alle der aufgezählten Kettenglieder, die für zeitige Planungsphasen (LP1-LP3) in Szenarien geclustert werden können:

- I Architektenentwurf
- II Gebäude als Verbraucher
- III Variantenstudie Anlagentechnik
- IV Leistungsmäßig begrenzte Anlagentechnik, ggf. mit intelligenter Regelung der Unterversorgung
- V Detailbetrachtungen zur Raumübergabe (luftbasierte Systeme und/oder wasserbasierte Systeme)
- VI Detailbetrachtungen zur Erzeugungstechnik

Die konkreten Szenarien werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert. Ihre Zuordnung zu den Leistungsphasen und Akteuren zeigt Tabelle 1.

Im *Szenario I* sind vorrangig Fragestellungen der Architektur zu beantworten. Insbesondere ist dies im Kontext von Architekturwettbewerben interessant. Welcher Entwurf verursacht weniger (Primär-)Energieverbrauch? Eine derartige Simulation kann auch zur Entwurfsoptimierung genutzt werden: Der Einfluss von Fenstergrößen, Sonnenschutzeinrichtungen und verschiedenen Bauschweren kann damit bewertet werden. Eine Auswertung ist nur auf Gebäudeebene sinnvoll. Eine Abbildung der Anlagentechnik sowie eine detaillierte Betrachtung der Nutzungsanforderungen ist in der Regel nicht notwendig.

Szenario II dient der Optimierung des Architektorentwurfs. Die äußere Gebäudegeometrie steht zu diesem Zeitpunkt bereits weitgehend fest, jedoch kann die innere Aufteilung des Gebäudes Gegenstand von Optimierungen sein. Typischerweise werden in diesem Szenario die Auswirkungen unterschiedlicher Wandstärken, U-Werte und g-Werte sowie Verschattungsfaktoren untersucht. Kriterien dafür sind insbesondere der (Primär-)Energiebedarf des Gebäudes, sowie Lasten ausgewählter Zonen. Weiterhin können die Nutzungsanforderungen Gegenstand der Betrachtung sein – etwa inwiefern die Vorgabe gleitender Raumsolltemperaturen Energieeinsparungen ergibt. Dementsprechend sollte eine detaillierte Abbildung der inneren Lasten mit Zeitplänen erfolgen.

Szenario III dient der Konzeptfindung für die technische Gebäudeausrüstung. Eine gekoppelte Simulation von Nutzung und Bauphysik ist nicht notwendig, viel mehr können die Ergebnisse der *Szenarien I* oder *II* als Eingangsdaten dienen. Eine

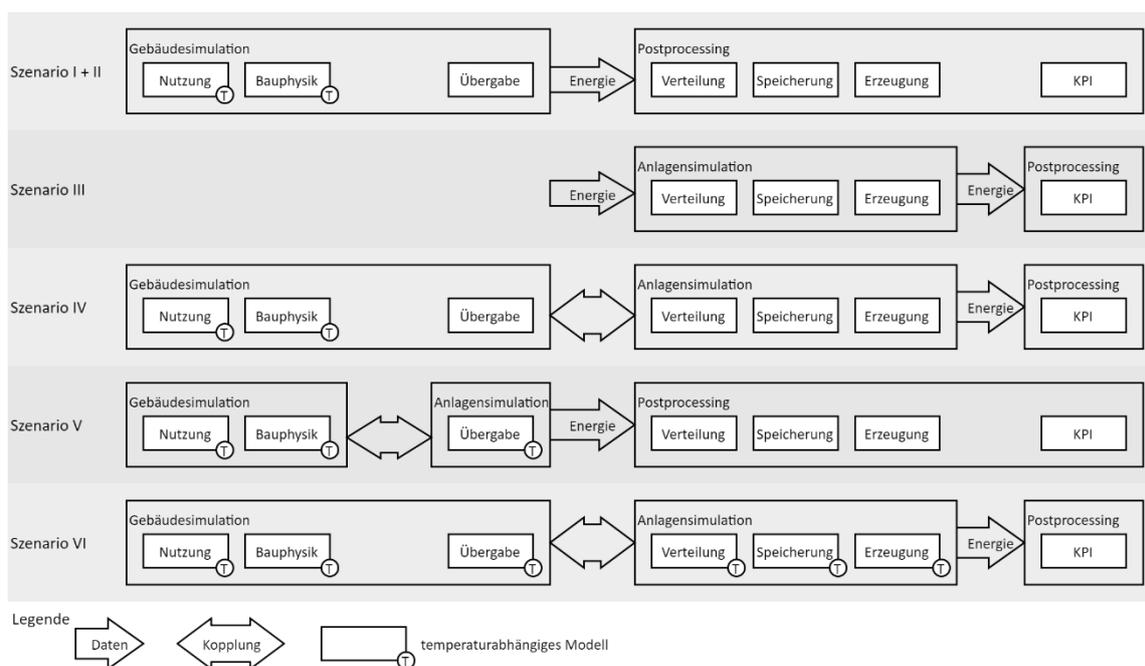


Abbildung 2: Kopplungsgrößen/Datenflüsse in den verschiedenen Szenarien

Datenübergabe in Form stündlicher Energiebedarfe ist ausreichend, um verschiedene Konzepte der Energieversorgung vergleichend untersuchen zu können. Die Erzeuger müssen lastabhängig modelliert werden, da abweichende Wirkungsgrade bei Teillastzuständen der entscheidende Vorteil einer Simulation in *Szenario III* im Vergleich zu einem statischen Variantenvergleich darstellen. Es erfolgt eine Auswertung auf Gebäudeebene, meist bezogen auf (Primär-)Energieverbrauch oder Kosten (Invest und Betrieb).

Szenario IV soll den Einfluss von leistungsbegrenzter Erzeugungstechnik untersuchen. Die Auswertung erfolgt dabei hinsichtlich der sich einstellenden Temperaturen (Über- und Untertemperaturgrad-Stunden) in ausgewählten Zonen oder im Gesamtgebäude. Beispielhafte Fragestellung sind: Wieviel zu kalt wird es im Gebäude bei ausschließlicher Beheizung mit einer knapp dimensionierten Solarthermieanlage? Welche Komforteinbußen gibt es bei stromgeführten Betrieb eines KWK-Erzeugers? Wie stark überhitzt das Gebäude ohne maschinelle Kühlung? Die Erzeugermodelle müssen für dieses Szenario eine Leistungsbegrenzung vorsehen. Weiterhin muss das Verteilsystem derart modelliert werden, dass es eine geregelte Verteilung des Mangels ermöglicht. Denkbar sind neben gleichmäßiger Verteilung auch eine Abhängigkeit vom hydraulischen Widerstand oder eine Regelung nach „Raumpriorität“.

In den *Szenarien Va* und *Vb* soll der Einfluss unterschiedlicher Raumübergabesysteme untersucht werden. Dies ist typischerweise notwendig, wenn neben Heizungsanlagen auch Lüftungsanlagen geplant sind (*Szenario Va*). Während für Heizkörperanlagen eine idealisierte Modellierung wie

in den vorhergehenden Szenarien (d.h. die Annahme, dass die notwendige Leistung abgedeckt werden wird) keine große Abweichung zur späteren Realität im Gebäude darstellt, insbesondere da dies wesentliches Zielkriterium der Planung ist, ist dies für Lüftungsanlagen nicht gegeben. Reale Anlagen können weit vom Idealfall einer isothermen Frischluftzufuhr in die Räume entfernt sein, da aufgrund der voluminösen Anlagentechnik Zulufttemperaturen nur zonengruppenweise geregelt werden kann. Somit kann ein nennenswerter Lastein- oder -abtrag aufgrund der Lüftungsvolumenströme erfolgen. Dies macht die gleichzeitige Berechnung von Zonenheizung und Lüftungsanlage notwendig. Es erfolgt eine Auswertung hinsichtlich Heiz-(Kühl-)Last der statischen Heizung.

Sollen sehr träge Übergabesysteme (dies sind in der Regel bauteilintegrierte Systeme) zum Einsatz kommen (*Szenario Vb*), ist eine Detailuntersuchung ebenfalls angezeigt. Typische Fragestellungen sind hierbei nach den notwendigen Vorlauftemperaturen im Heiz- und Kühlfall bzw. nach der Auswirkung unterschiedlicher Regelungen derselben. Es erfolgt eine Auswertung hinsichtlich der sich einstellenden Temperaturen.

In den *Szenarien V* muss die Modellierung der Übergabeelemente daher temperaturbasiert erfolgen.

Insbesondere beim Einsatz erneuerbarer Energien für die Gebäudekonditionierung (*Szenario VI*) kommt es zu Systemtemperaturen, die bei klassischen Planungsansätzen keine Lösung ermöglichen. Temperaturbasierte Berechnungsansätze für Übergabe- und Erzeugungssystem werden in diesen Fällen nötig, beispielsweise um bewerten zu können, mit welcher Vorlauftemperatur eine Wärmepumpe betrieben werden sollte. Die Auswertung erfolgt dabei hinsichtlich KPI des Gesamtgebäudes.

ZUSAMMENFASSUNG

Die vorstehenden Ausführungen zeigen auf, dass unterschiedliche Anforderungen an die Modellierung der Kettenglieder eines Gebäudeplanungsprozesses sowohl für unterschiedliche Gebäudetypen und Versorgungskonzepte als auch für verschiedene Planungsstadien bestehen.

Die Szenarien sind charakterisiert durch die Art der Modellierung der Kettenglieder (siehe Abbildung 2 und Tabelle 2) sowie die Stelle und die Art der Simulatorkopplung. Aus den Beschreibungen ergibt sich, dass nicht in jedem Szenario eine Simulation der gesamten Energieumwandlungskette notwendig ist (*Szenarien I, II, V*), sondern dass viele Betrachtungen als analytische Nachbetrachtung erfolgen können. Dies gilt spätestens für die Ermittlung der KPI aus den Simulationsergebnissen. *Szenario III* kann mit sequentieller Simulation (aufbauend auf *Szenario I* oder *II*) ausreichend gut abgebildet werden. Lediglich die *Szenarien IV* bis *VI* erfordern eine echte Simulatorkopplung. Dabei ist teilweise die Kopplung von thermischen Leistungen ausreichend, teilweise ist die Kopplung basierend auf Temperaturen und Masse-/Volumenströmen notwendig.

Die Aufteilung in Gebäude- und Anlagensimulation, wie sie in Abbildung 2 dargestellt ist, folgt dem am Markt verfügbaren Werkzeugen. Die Kettenglieder Nutzung&Bauphysik sowie Verteilung&Speicherung&Erzeugung sind dabei immer innerhalb eines Simulationstools angesiedelt, man kann dies als „interne Kopplung“ bezeichnen.

AUSBLICK

Basierend auf den erarbeiteten Szenarien können die am Markt verfügbaren Simulationsmodelle und -werkzeuge auf ihre Eignung überprüft werden. Bestehende Lücken sowohl bei den Simulationsmodellen wie auch bei den Kopplungswerkzeugen werden im Verbundprojekt *FMI4BIM* bearbeitet. Dabei wird auch die Lebensphase „Gebäudebetrieb“ mitgedacht, da für einige Simulationsmodelle eine sinnvolle Nachnutzung in dieser Phase absehbar ist.

Weiterhin wird eine Methodik erarbeitet, die aus der Planung ohnehin vorhandenen Informationen möglichst nahtlos für die Simulation nutzbar zu machen und die Simulationsergebnisse ebenso nahtlos den Planungsbeteiligten zur Verfügung zu stellen. Die zunehmende Nutzung der BIM-Methodik im Planungsprozess schafft dabei wichtige Voraussetzungen, dies effizient und damit kostengünstig zu tun.

DANKSAGUNG

Die beschriebenen Untersuchungen wurden im Verbundprojekt *FMI4BIM* durchgeführt, das vom BMWI unter dem Förderkennzeichen 03ET1603A gefördert wird.

LITERATURVERZEICHNIS

AHO e.V. (2019). *Leistungen Building Information Modeling - Die BIM-Methode im Planungsprozess der HOAI*. Reguvis.

buildingSMART International. (12. 03 2020). *BCF. BIM Collaboration Format*. <https://technical.buildingsmart.org/standards/bcf/>.

DIN 276. (12 2018). *Kosten im Bauwesen*.

DIN 4108-2. (2013). *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*.

DIN V 18599. (2018). *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung*.

EEWärmeG. (2015). *Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich*.

EnEV. (2016). *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden*.

Hausknecht, K., & Liebich, T. (2016). *BIM-Kompendium: Building Information Modeling als neue Planungsmethode*.

HOAI. (2013). *Honorarordnung für Architekten und Ingenieure*.

ISO 16739. (2018). *Industry Foundation Classes (IFC) für den Datenaustausch in der Bauwirtschaft und im Anlagenmanagement*.

van Treeck, C. e. (2017). *EnEff-BIM: Planung, Auslegung und Betriebsoptimierung von energieeffizienten Neu- und Bestandsbauten durch Modellierung und Simulation auf Basis von Bauwerkinformationsmodellen*. Abschlussbericht.

VDI 2078. (2015). *Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation)*.

VDI 6026-1. (2008). *Dokumentation in der Technischen Gebäudeausrüstung - Blatt 1: Inhalte und Beschaffenheit von Planungs-, Ausführungs- und Revisionsunterlagen*.

Vogel, P., & Schünemann, C. (2017). *BIM im Planungsprozess der TGA*. GI 01/2017, 44-52.

Wetter, M., & van Treeck, C. (2017). *New generation computational tools for building and community energy systems*. EA EBC Annex 60. Final Report I.

EVUALIERUNG DES EINFLUSSFAKTORS FENSTERLÜFTUNG IN DER NACHWEISFÜHRUNG SOMMERLICHER ÜBERWÄRMUNG IM WOHNBAU

A. Kraft¹, M. Gratzl² und T. Reiter¹

¹FH Salzburg Studiengang Smart Building, 5431 Kuchl, Österreich

²Ingenieurbüro Gratzl, 4715 Taufkirchen, Österreich

KURZFASSUNG

Die passive Kühlung durch Fensterlüftung ist im mehrgeschossigen Wohnbau besonders relevant. Diese Arbeit untersucht die Rolle des Einflussfaktors natürliche Lüftung im normativen Nachweis über die Vermeidung sommerlicher Überwärmung. Dazu wird der normative Nachweis mit der Berechnung des Tagesverlaufes der operativen Temperatur bei fünf mehrgeschossigen Wohnbauten für einen Raum geführt. Die Ergebnisse werden einer thermisch-dynamischen Simulation mit IDA ICE gegenübergestellt. In der Simulation werden die Randbedingungen mit detaillierten Nutzerprofilen bezüglich Anwesenheit und Lüftungsverhalten möglichst realitätsnah abgebildet. Natürliches Lüften erscheint in der ÖNORM-Berechnung als stark abstrahiert und es ergeben sich Abweichungen von der thermisch-dynamischen Simulation.

ABSTRACT

Passive cooling through natural ventilation air flow is particularly relevant in multi-storey residential buildings. This paper investigates the role of natural ventilation in the verification of the overheating compliance of a dwelling. Five different zones are calculated with the ÖNORM method "Determination of the operating temperature in summer". In comparison, a thermal-dynamic simulation is conducted for each zone to display the boundary conditions as realistic as possible. Natural ventilation air flow seems underrepresented in the ÖNORM method, as for example patch airing does not play a role at all. Therefore, the results from the simulation differ.

EINLEITUNG

Die Untersuchungen der ZAMG ergeben, dass in Österreich die Lufttemperatur steigt und die Hitzeperioden in ihrer Anzahl und Länge zunehmen. Gründe dafür sind sowohl die Klimaveränderung als auch die zunehmende Oberflächenversiegelung. In den 1980er-Jahren setzte die intensivste und schnellste Erwärmung der Gegenwart ein. (ZAMG, 2020) Dies ist in der Abbildung 1 ersichtlich. Sie zeigt die jährliche Durchschnittstemperatur von 1842-2018 in Salzburg.

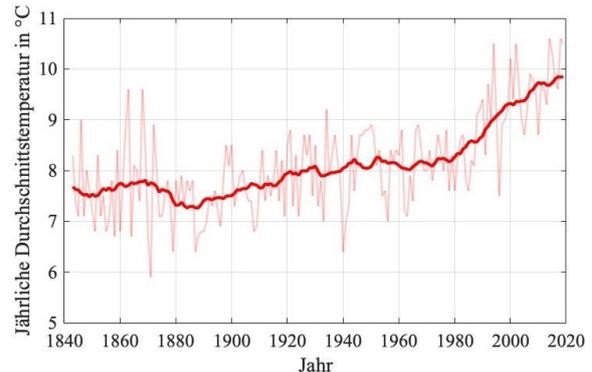


Abb. 1: Jährliche Durchschnittstemperatur in Salzburg von 1843-2018 (hell) und Durchschnitt über 20 Jahre (dunkel), HISTALP-Datensatz

Betrachtet man die Emissionen der Treibhausgase und deren Hauptrolle im menschengemachten Klimawandel, ist es wünschenswert, die Behaglichkeit in den Räumen möglichst ohne den Einsatz von aktiver Kühlung zu gewährleisten (Umweltbundesamt GmbH, 2019, S. 49–54). Die vorliegenden Gegebenheiten stellen verstärkte Ansprüche an die Planung, Errichtung und Nutzung von Gebäuden bezüglich ihrer Sommertauglichkeit. Die Fensterlüftung zur passiven Kühlung erzeugt keine Zusatzkosten und ist für die Aktivierung der vorhandenen Speichermassen erforderlich (Ferk, Rüdiger, Riederer & Majdanac, 2016). Ihre Kostenneutralität macht die Fensterlüftung vor allem im gemeinnützigen Wohnbau zu einem relevanten Einflussfaktor auf die Sommertauglichkeit.

Die Vermeidung der sommerlichen Überwärmung von Gebäuden ist gemäß der OIB-Richtlinie 6 verpflichtend nachzuweisen (OIB, 2015, S. 7). Der Nachweis im gemeinnützigen Wohnbau wird in der Regel gemäß der ÖNORM B 8110-3:2012 geführt. Es werden die öffentbaren Fenster, wenn aufgrund Schallschutz und Einbruchschutz möglich, in der Nacht grundsätzlich als geöffnet angenommen. (Experteninterview, 2019) Hier ergibt sich ein Spannungsfeld zwischen Vermieter und Mieter. Beispielsweise könnte eine Nachtlüftung vom Nutzer nicht gewünscht sein. Dies könnte das positive Ergebnis bezüglich Sommertauglichkeit verfälschen. Weiters ist mit zunehmenden Außenlufttemperaturen

zu rechnen, was die Effektivität der passiven Kühlung durch Fensterlüftung beeinträchtigen könnte.

Das Ziel dieses Artikels ist es, aufzuzeigen, wie sich die Fensterlüftung, auch in Verbindung mit den sich verändernden Außenklima-Randbedingungen, auf die Temperaturentwicklung auswirkt, und wo es diesbezüglich Fehlerpotenzial im normativen Nachweisverfahren gibt. Zu diesem Zweck wird im Untersuchungsteil der Nachweis mittels des Verfahrens der Berechnung der operativen Temperatur nach der ÖNORM B 8110-3:2012 bei fünf Objekten im gemeinnützigen Wohnbau geführt und mit einer thermisch-dynamischen Simulation verglichen. Die Simulation soll die Randbedingungen möglichst realitätsnah abbilden. Mittels des Vergleiches sollen Rückschlüsse auf die Zuverlässigkeit der Abbildung des Faktors Fensterlüftung im normativen Nachweisverfahren der ÖNORM B 8110-3 gezogen werden.

Für die praktische Umsetzung der ÖNORM B 8110-3:2012 wird die Software GEQ Version 2020.3 verwendet (Zehentmayer Software GmbH, 2020). Für die thermisch-dynamischen Simulationen wird IDA ICE Version 4.8 SP1, eine Software für die Beurteilung des Innenraumklimas und des Energieverbrauchs von Gebäuden, genutzt (EQUA Simulation AB, 2018). Deren Validierung erfolgte nach der Norm CEN 13791 „Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik - Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren“ (Kropf & Zweifel, 2001). Es wird jeweils ein Raum im Objekt betrachtet. In der Simulation entspricht dies einer Zone. Die Klimadaten als Grundlage für die Simulation wurden mit Meteororm V7.3 für das Jahr 2016 generiert. Die Referenzperiode für die Globalstrahlung ist 1991-2010. Die Referenzperiode für die übrigen meteorologischen Parameter ist 2000-2009. Die Klimadaten sind nicht gemessen, sondern entsprechen einem typischen Klimaverlauf über einen Sommer.

Für den Untersuchungsteil wird die derzeit noch gültige ÖNORM B 8110-3:2012 verwendet. Wichtig zu erwähnen ist, dass für die ÖNORM B 8110-3 bereits ein Normentwurf vorliegt. Die Änderungen für die Berechnungsweise des Tagesverlaufs der operativen Temperatur im Normentwurf sind jedoch geringfügig.

HINTERGRUND

In diesem Kapitel wird zunächst auf die Außenklimarandbedingungen und die Fensterlüftung in der normativen Nachweisführung eingegangen. Die OIB-Richtlinie 6 (2015) verweist bezüglich sommerlicher Überwärmung auf die ÖNORM B 8110-3:2012. In der ÖNORM B 8110-3:2012 gibt es zwei normative Nachweisverfahren:

- Das vereinfachte Verfahren über die speicherwirksame Masse, unabhängig vom Standort des zu betrachtenden Objektes
- Das Verfahren über die Berechnung des Tagesverlaufs der operativen Temperatur

Nach der Berechnung des Tagesverlaufs der operativen Temperatur gemäß ÖNORM B 8110-3:2012 gilt die sommerliche Überwärmung als vermieden, wenn die operative Temperatur 27 °C über eine 24 h-Periode nie überschreitet. Bei Schlafräumen muss von 22:00 Uhr bis 6:00 Uhr zusätzlich eine Unterschreitung von 25 °C gegeben sein.

Die neuen Fassung, der Normentwurf ÖNORM B 8110-3:2018, formuliert für Haupträume keinen absoluten Grenzwert mehr. Der Grenzwert ist ab Inkrafttreten der OIB-Richtlinie 6 (2019) durch einen Bezug zur Normsommerraußentemperatur $\theta_{(NAT,13)}$ geregelt, da laut dem OIB die Einhaltung einer absoluten operativen Temperatur unabhängig vom Standort nicht möglich ist.

Das vereinfachte Verfahren ist im Normentwurf ÖNORM B 8110-3:2018 nicht mehr enthalten. Die OIB-Richtlinie 6 (2019) verweist für die Nachweisführung nicht mehr explizit auf die ÖNORM B 8110-3, sondern auf Verfahren mit „einem sich täglich periodisch wiederholenden Außenklima“. Dies entspricht der Berechnung des Tagesverlaufs der operativen Temperatur gemäß ÖNORM B 8110-3 in der gültigen Fassung 2012 sowie im Normentwurf 2018, lässt aber auch eine thermisch-dynamische Simulation zu.

Die Normsommerraußentemperatur gemäß ÖNORM B 8110-5:2019 ist der 24 Stunden-Mittelwert (Tagesmittelwert), der an 130 Tagen innerhalb von 10 Jahren überschritten wird. Die Norm verweist für die Ermittlung dieses Wertes auf die Datei „OIB-Richtlinie 6, NAT-T13 Excel“. Dieses Excel-Tool ist sowohl Teil der OIB-Richtlinie 2015 als auch 2019. Die Temperaturen werden in Abhängigkeit von der Klimaregion berechnet. Österreich teilt sich in sieben Klimaregionen. Die Werte beziehen sich auf die Jahre 1981 bis 2000 und sind abhängig von Standort (Katastralgemeinde), Klimaregion und Seehöhe. (OIB, 2015)

Bezüglich des heranzuziehenden Außenlufttemperaturverlaufs für die Berechnung des Tagesverlaufs der operativen Temperatur wird ebenfalls die Normsommerraußentemperatur an-gesetzt. Der Tagesgang der Außenlufttemperatur wird mittels festgelegter Abweichungen von der Normsommerraußentemperatur über einen 24h-Verlauf ermittelt. Die maximale Abweichung liegt bei +6,64 K und die minimale Abweichung bei -7,24 K.

Öffenbare Fensterelemente werden bei der Berechnung des Tagesverlaufs der operativen Temperatur zur Berechnung des Luftvolumenstroms und zur Darstellung der Nachtlüftung berücksichtigt.

Es werden stundenweise Vorgaben zu personen- oder grundflächenbezogenen Luftwechselraten getroffen. Die Öffnungsweite ist für das jeweilige Fensterelement pauschal als gekippt oder gänzlich geöffnet zu definieren. Für die Möglichkeit der Nachtlüftung müssen Sicherheits- und Schallschutzerfordernisse erfüllt sein. Dies ist die Vorgabe des Bauherrn (im gemeinnützigen Wohnbau = Vermieter) und ist in einem Bericht zu dokumentieren.

UNTERSUCHUNG

Es wird der Nachweis über die Vermeidung der sommerlichen Überwärmung bei fünf Wohnbauten eines gemeinnützigen Bauträgers mit einer thermisch-dynamischen Simulation (in weiterer Folge „Simulation“) und dem Verfahren der Berechnung des Tagesverlaufs der operativen Temperatur (in weiterer Folge „ÖNORM-Berechnung“) gemäß der ÖNORM B 8110-3:2012 durchgeführt.

Außenklima-Randbedingungen

Es werden Projekte an möglichst unterschiedlichen Standorten im Bundesland Salzburg gewählt, um unterschiedliche Klimasituationen zu untersuchen. In Tabelle 1 sind die Standorte der Projekte und deren Normsommeraußentemperatur angeführt, welche bei der ÖNORM-Berechnung herangezogen wird.

Tab. 1: Projektdaten Standort, Normsommeraußentemperatur, Ausrichtung

PROJEKT	STANDORT	$\theta_{NAT,13}$ °C	AUSR.
PROJEKT 1	Bischofshofen	21,1	West
PROJEKT 2	Anif	21,7	Süd
PROJEKT 3	Kuchl	21,5	Südwest
PROJEKT 4	Salzburg	21,7	West
PROJEKT 5	Mariapfarr	18,3	Süd

Bei den Meteonorm-Klimadaten für die Simulation werden die Daten Außenlufttemperatur, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeiten von Wetterstationen und Satellitendaten herangezogen. Ist am ausgewählten Standort keine Wetterstation vorhanden, werden die Daten der umliegenden Wetterstationen interpoliert.

Zum direkten Vergleich mit der ÖNORM-Berechnung wird die Simulation mit einem „design day“ durchgeführt, an dem die Mindest- und Maximalaußentemperaturen dem Außentemperaturverlauf der ÖNORM B 8110-3:2012 entsprechen. Für die Windrichtung wird die jeweils häufigste des Standortes von Juni bis September laut Klimadaten herangezogen. Die sonstigen Parameter sind zu vernachlässigen. Weiters werden die Projekte zur Untersuchung mit den Außenklima-Randbedingungen über einen Zeitraum von 15.06. – 15.09. simuliert.

In der Abbildung 2 ist der Außentemperaturverlauf generiert aus Meteonorm für die Simulation über einen Sommer von Projekt 4 – Salzburg und Projekt 5 – Mariapfarr exemplarisch dargestellt. Die jeweilige Normsommeraußentemperatur als Grundlage für den Tagesgang der Außenlufttemperatur in der ÖNORM-Berechnung und den „design day“ ist ebenfalls ersichtlich.

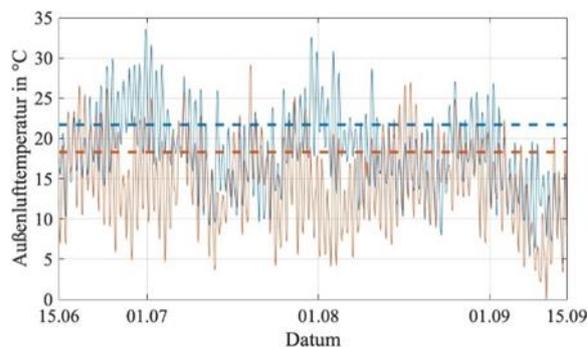


Abb. 2: Außenlufttemperaturverlauf in Salzburg (Projekt 4 - blau) und Mariapfarr (Projekt 5 - braun) sowie deren Normsommeraußentemperaturen (strichliert)

Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Projekten zu gewährleisten, werden Projekte mit Fertigstellung zwischen 2018 und 2020 gewählt.

Die Auswahl der zu betrachtenden Räume erfolgt nach folgenden Kriterien:

- Wohnraum
- Süd-, Südwest-, Südost-, Westausrichtung
- Ungünstiges Verhältnis von transparenten Bauteilen und Raumvolumen
- Räume die dreiseitig von Gipskartonwänden umschlossen sind

In der Tabelle 2 sind die aus den Ausführungsplänen und Energieausweisen entnommenen Projektdaten der ausgewählten Räume ersichtlich. Die thermisch-dynamische Simulation lässt einen höheren Detaillierungsgrad in der Erfassung zu. Es folgen Anmerkungen zur Berücksichtigung der Einflussfaktoren in der Simulation.

Interne Lasten

Für die Nutzungsprofile von Personen, Geräten und Beleuchtung wird in der Simulation die Norm SIA 2024:2015 verwendet. Diese Norm stellt detaillierte Nutzungsprofile für verschiedene Raumnutzungen zur Verfügung und differenziert zwischen Bestands- und Neubauten. Sie lässt sich direkt in IDA ICE implementieren. Das hinterlegte Nutzungsprofil für „Wohnen MFH gesamt“ wurde in Wohnraum und Schlafraum gesplittet.

Tab. 2: Bauweise, Nutzfläche, Raumvolumen, Fensterfläche, Verhältnis FF/NF, durchschnittl. U-Wert Außenbauteile, durchschnittl. U-Wert Fenster, g-Werte der Fenster, Speichermasse pro m² NF, n₅₀-Wert

PROJEKT	BAUWEISE	NF m ²	V m ³	FF m ²	FF/ NF	Ø U. W/m ² K	Ø U.W W/m ² K	g-Wert -	SM kg/m ²	n ₅₀ 1/h
PROJEKT 1	Stahlbeton	30,9	77,2	14,3	46 %	0,15	0,81	0,38, 0,52	478,4	1,0
PROJEKT 2	Mantelbetonstein	30,8	67,7	13,2	42 %	0,16	0,81	0,52	307,4	1,0
PROJEKT 3	Brettsperrholz	31,0	78,6	12,0	38 %	0,15	0,69	0,51	197,9	1,0
PROJEKT 4	Stahlbeton	29,4	74,2	10,4	35 %	0,16	0,76	0,38, 0,61	587,2	1,0
PROJEKT 5	Mantelbetonstein	27,8	69,4	7,8	28 %	0,15	0,75	0,51	476,91	1,0

Solare Erträge, Sonnenschutz, Verschattung

Alle untersuchten Projekte wurden ohne Sonnenschutz ausgeführt. Die bauliche Verschattung über Balkone, Auskragungen, Geländer und umliegende Gebäude wird in der Simulation als 3D-Modell aufgebaut (Beispiel Abb. 3). Die Objekthöhen und Abstände für das 3D-Modell werden dem SAGIS (Land Salzburg, 2020) entnommen.

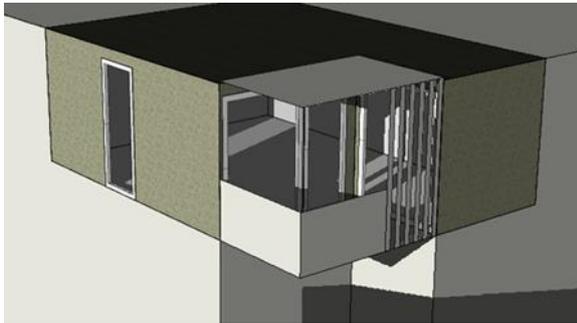


Abb. 3: 3D-Modell Projekt 3 in IDA ICE

Mechanische Lüftung

Die Sicherstellung des hygienischen Mindestluftwechsels in den Räumen erfolgt durch eine bedarfsgesteuerte Abluftanlage mit Nachstromöffnungen in den Fensterelementen. Diese läuft auf Grundstufe durch und stellt einen konstanten Luftwechsel von 0,4 h⁻¹ sicher. Es wurde ein konstanter Volumenstrom dementsprechend angenommen. Zur Nachbildung der Zuluftöffnungen wurde in der Simulation festgelegt, dass die Zulufttemperatur der Außenlufttemperatur entspricht. Für die Infiltration wurde der jeweilige n₅₀-Wert angesetzt.

Fensterlüftung

Bei allen Projekten ist die Nachtlüftung unter objektiver Betrachtung von Schall- und Einbruchschutz zumutbar. Öffnbare Fenster werden in der ÖNORM-Berechnung also als geöffnet angenommen. Bei Projekt 4 kommt aufgrund der Lage im Immissionsbereich eine vorgelagerte Lärmschutzloggia zur Ausführung.

Die Pegelminderung ist im teilgeschlossenen Zustand ausreichend und wurde daher in der Simulation so angenommen.

Um die Fensterlüftung durch die Bewohner möglichst realitätsnah nachzubilden, wurde ein Regelungsschema mit zwei Thermostatreglern erstellt. Die Öffnung wird an die Anwesenheitszeiten der Personen gekoppelt. Weiters wird nur gelüftet, wenn die Außenlufttemperatur mindestens 0,5 K unter der operativen Temperatur des Raumes liegt und die operative Temperatur mindestens 0,5 K über der Solltemperatur „cooling setpoint“ von 23 °C liegt („deadband“ = 1 K). Das Regelungsschema ist in Abbildung 4 ersichtlich. Erst wenn alle drei Bedingungen erfüllt (= 1) sind, wird das Fenster geöffnet. Von 22:00 Uhr – 6:00 Uhr wird Kippen angenommen (Öffnung von 10 % der Fensterfläche). Ansonsten werden die Fenster als ganz geöffnet angenommen.

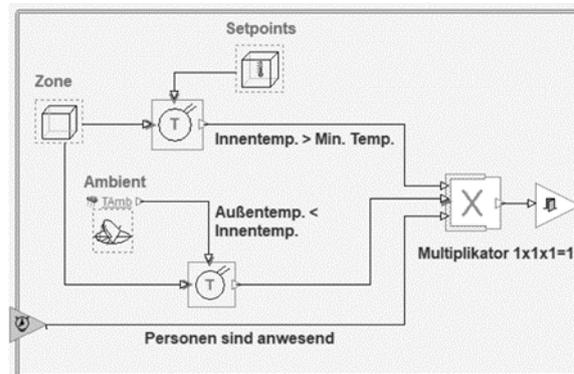


Abb. 4: Lüftungsschema als Macro in IDA ICE

In der Tabelle 3 ist zusammenfassend dargestellt, wie die Einflussgrößen in der ÖNORM-Berechnung und in der Simulation berücksichtigt werden.

ERGEBNISSE

Es wird der Nachweis gemäß der ÖNORM-Berechnung und der thermisch-dynamische Simulation mit dem „design day“ durchgeführt. Die Ergebnisse der Nachweisführung werden gegenübergestellt und die Abweichungen zwischen ÖNORM-Berechnung und Simulation werden verglichen. In weiterer Folge erfolgt ein Vergleich mit der ÖNORM-Berechnung mit gekippten Fenstern sowie mit der Simulation über einen Sommer.

Tab. 3: Zusammenfassung Berücksichtigung der Einflussfaktoren

	ÖNORM-BERECHNUNG	SIMULATION
KLIMADATEN	Stundenwerte $\theta_{NAT,13}$ Standort	Stundenwerte Meteororm-Klimadaten Standort
PERSONEN	Stundenwert/m ²	Stundenwert/Person (SLA 2024:2015)
GERÄTE	Stundenwert/m ²	Stundenwert/m ² (SLA 2024:2015)
BELEUCHTUNG	nicht gesondert	Stundenwerte/m ² (SLA 2024:2015)
SPEICHERMASSE	Vollständige Erfassung der Bauteile	Vollständige Erfassung der Bauteile
SOLARE ERTRÄGE	g-Wert, Abminderungsfaktoren für Orientierung	Strahlungsmatrix
SONNENSCHUTZ	nicht vorhanden	nicht vorhanden
VERSCHATTUNG	Abminderungsfaktoren, Bestrahlungsstärken	Verschattungsmatrix 3D-Modell
MECH. LÜFTUNG	Stundenwert (konstanter Volumenstrom)	Stundenwert (konstanter Volumenstrom)
FENSTERLÜFTUNG	Stundenwert/m ² (+ Fenster offen/geschlossen)	Strömungsmodell (+ Regelung Nutzerverhalten)

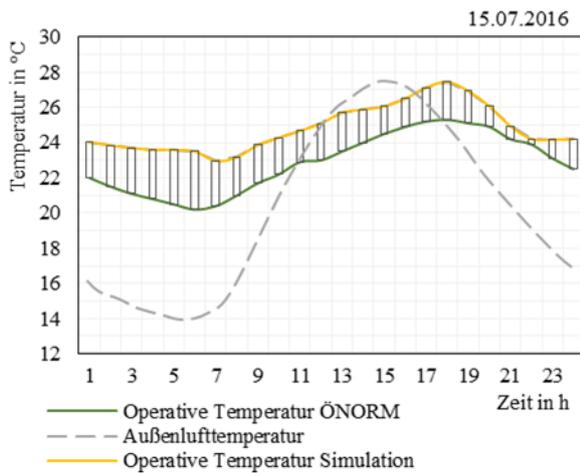


Abb. 5: Vergleich ÖNORM-Berechnung und Simulation mit gleichen Außenklimabedingungen

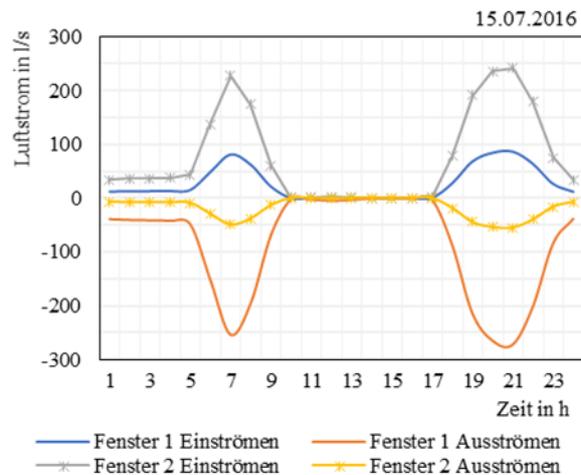


Abb. 6: Luftstrom durch Fensterlüftung bei Projekt 1, Σ aller Massenströme = 0

Ergebnisse Vergleich Tagesverlauf der operativen Temperatur und Simulation „design day“

In der Tabelle 4 ist das Ergebnis über die Erfüllung der Nachweisführung mit der operativen Maximaltemperatur angeführt. Das Kriterium für die Simulation ist ebenfalls die Obergrenze der aktuell gültigen ÖNORM B 8110-3:2012 von 27 °C.

Tab. 4: Ergebnisse der Nachweisführung

PROJEKT	ÖNORM OT.MAX. °C		SIMULATION OT.MAX. °C	
PROJEKT 1	25,3	✓	27,5	X
PROJEKT 2	30,8	X	31,8	X
PROJEKT 3	28,5	X	27,3	X
PROJEKT 4	26,8	✓	26,4	✓
PROJEKT 5	25,0	✓	25,4	✓

Bei Projekt 1 wird die Obergrenze von 27 °C in der ÖNORM-Berechnung eingehalten. In der Simulation wird sie geringfügig überschritten. Ansonsten stimmt die Erfüllung des Nachweises überein.

Exemplarisch wird in Abbildung 5 der Vergleich zwischen den operativen Temperaturverläufen in Verbindung mit dem Verlauf der Außentemperatur für das Projekt 1 dargestellt.

Bei Projekt 1 liegt die Temperatur bei der Simulation bis ca. 20:00 Uhr etwa 2 K über der Temperatur der ÖNORM-Berechnung. Von 18:00-23:00 Uhr wird bei der Simulation kühlungswirksam gelüftet und die Kurven gleichen sich an. In der Nacht fällt die Temperatur in der ÖNORM-Berechnung durch die pauschale Annahme „Fenster geöffnet“ stärker ab.

In der Abbildung 5 ist der natürliche Luftwechsel bei Projekt 1 für die Simulation exemplarisch dargestellt. Um die Mittagszeit sind Personen anwesend. Da die Außentemperatur über der Innentemperatur liegt, bleiben die Fenster geschlossen. In den Abendstunden wird erst gelüftet, wenn die Außentemperatur unter die Innentemperatur fällt. In den Morgenstunden wird ebenfalls stoßgelüftet. Dies ist auch in Abbildung 4 erkennbar. In der Nacht ist der Luftwechsel bei der Simulation geringer - die Fenster sind gekippt.

Die in Abbildung 5 sichtbare Abweichung zwischen den Ergebnissen der ÖNORM-Berechnung und den Simulationsergebnissen wird in der folgenden Abbildung 7 für alle Projekte aufgetragen. Zur

Ermittlung der Abweichung in K wird die ÖNORM-Temperatur von der Simulationstemperatur subtrahiert.

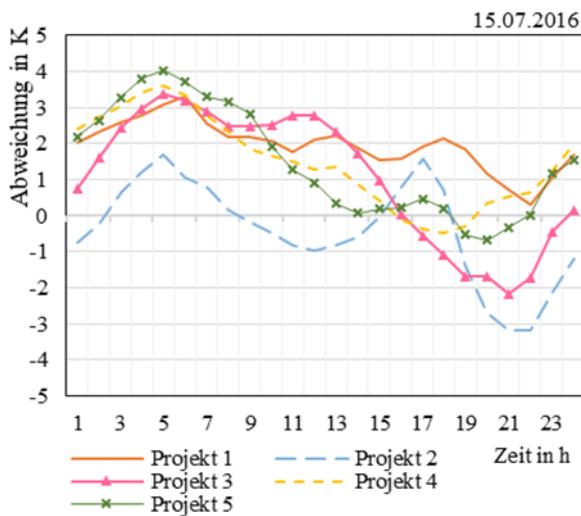


Abb. 7: Abweichung der operativen Temperatur = Simulation - ÖNORM-Berechnung

Bei vier Projekten liegt die operative Temperatur in der Simulation bis 16:00 Uhr über der ÖNORM-Berechnung. In den späten Nachmittags- und Abendstunden, wo sich solare Einträge und interne Lasten kumulieren, ergibt sich in der Simulation bei vier Projekten ein etwas günstigeres Raumklima als in der ÖNORM-Berechnung. Ein kühlungswirksames Lüften ist in der Simulation je nach Ausrichtung ab 16:00 Uhr bzw. 19:00 Uhr möglich. Sobald ein kühlungswirksames Lüften möglich ist, fällt die Temperatur bei vier Projekten unter die Temperatur der ÖNORM-Berechnung. In den Nachtstunden ergibt sich eine besonders hohe Abweichung der Simulationsergebnisse zu den Ergebnissen der ÖNORM-Berechnung von bis zu 4 K. Der Grund dafür ist, dass die Temperaturen in der ÖNORM-Berechnung durch die pauschale Annahme „Fenster geöffnet“ auf ca. 20 °C, je nach der Normsommertemperatur am Standort, abfallen. Bei Projekt 5 mit der niedrigsten Normsommertemperatur ist die Abweichung der Simulation in den Nachtstunden am größten. Durch das Stoßlüften am Morgen sinkt die Temperatur bei der Simulation jedoch schnell ab und die Simulationsergebnisse gleichen sich eher an die Ergebnisse der ÖNORM-Berechnung an.

Bei Projekt 2 ergibt sich eine Abweichung, da es, wie in Tabelle 3 ersichtlich, zur Überhitzung neigt. Die Außentemperatur liegt auch zur Mittagszeit unter der Innentemperatur. Daher wird in der Simulation während der Anwesenheitszeit der Personen gelüftet. Die ÖNORM-Berechnung berücksichtigt diesen Umstand nicht. Die Simulationstemperatur fällt unter die der ÖNORM-Berechnung. Nachdem das Fenster um 14:30 Uhr wieder geschlossen wird, steigt die Temperatur in der Simulation schnell wieder an.

Bei Projekt 4 wurde die Lärmschutzloggia in der Normberechnung nicht berücksichtigt, und die Wand zur Loggia als Außenwand angenommen, da ansonsten Temperaturen von über 40 °C das Ergebnis wären. Die Loggia ist ein Pufferraum zwischen Außenluft und Innenraum. Die Innentemperatur in der Simulation in der Nacht liegt daher ca. 3 K über der Innentemperatur gemäß ÖNORM. Die Temperatur in der Loggia liegt bis 19:30 Uhr über der Innentemperatur. Aus diesem Grund ergibt sich ein Unterschied zu den anderen Projekten.

Ergebnis Vergleich Tagesverlauf der operativen Temperatur (Fenster offen, Fenster gekippt) und Simulation „design day“

In der Grundvariante wurden die öffnbaren Fenster in der ÖNORM-Berechnung als geöffnet angenommen. In einer weiteren Variante werden schließlich die Fenster in der ÖNORM-Berechnung als gekippt, mit einer Kippweite von 10 % angenommen und mit den Grundvarianten verglichen. Die jeweiligen maximalen operativen Temperaturen sind in Abbildung 7 ersichtlich.

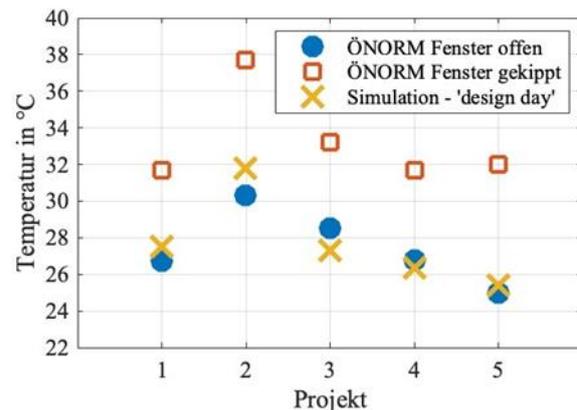


Abb. 8: Vergleiche der Maximaltemperaturen in der ÖNORM-Berechnung in den Varianten offen und gekippt, sowie Simulation „design day“

Werden in der Berechnung die Fenster als gekippt angenommen, könnte bei keinem der Projekte der Nachweis lt. ÖNORM B8110-3:2012 erbracht werden. Die Abweichung zwischen Variante „gekippert“ und Variante „offen“ beträgt im Durchschnitt 7 K. Bei Projekt 2, welches überhitzt und bei Projekt 5, wo die Normsommertemperatur am niedrigsten ist, ist die Differenz größer. Das Verhältnis zwischen der Variante „offen“ und der Simulation ist nicht durchgängig. Bei zwei Projekten ist die Temperatur in der Simulation niedriger (Projekt 3 – 1 K bzw. Projekt 4 - 0,5 K) als in der ÖNORM-Berechnung.

Ergebnisse Vergleich Tagesverlauf der operativen Temperatur und Simulation über ganzen Sommer

In einer zweiten Variante wird bei den Projekten eine Simulation von 15.06.-15.09. durchgeführt. Bei den

Projekten 1, 2 und 5 kommt es in der Simulation über den Zeitraum zu höheren Maximaltemperaturen als bei der ÖNORM-Berechnung (Grundvariante Fenster offen). Der Grund dafür ist, dass auch höhere Außentemperaturen auftreten, als die in der ÖNORM-Berechnung verwendete Normsommeraußentemperatur. Die Maximaltemperaturen an den jeweiligen Tagen, und die Häufigkeit der Überschreitung sind in Abbildung 8 aufgetragen.

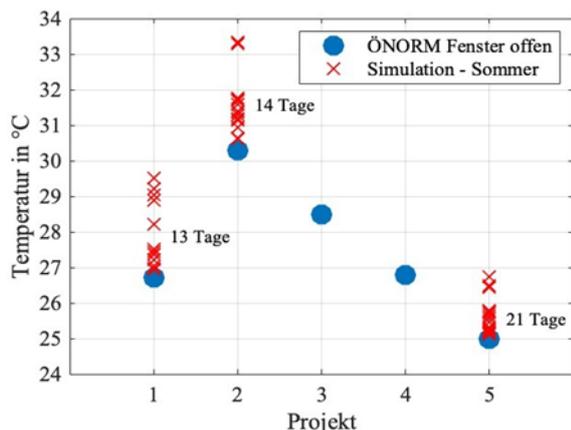


Abb. 9: Vergleich der ÖNORM-Berechnung mit einer Simulation über den ganzen Sommer

Bei drei Projekten wird die maximale Temperatur laut ÖNORM Berechnung überschritten. Die Abweichung beträgt maximal 2,8 K (Projekt 1) bzw. 2,6 K (Projekt 2). Bei Projekt 5 wird die Maximaltemperatur am häufigsten überschritten. Die Abweichung bei diesem Projekt ist geringer und bewegt sich zwischen 0,1 und 1,7 K. Bei den Projekten 1, 3 und 5 treten die Überschreitungen vor allem am Ende von mehrtägigen Hitzeperioden auf. Bei Projekt 3 und 4 liegt die Temperatur bereits bei der „design day“-Simulation unter der ÖNORM-Berechnung und wird auch über einen ganzen Sommer hinweg nicht überschritten.

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem abschließenden Kapitel werden die Ergebnisse zur Abbildung des Einflussfaktors Fensterlüftung zusammengefasst und diskutiert.

Aus den Vergleichen mit der Simulation ergibt sich, dass kühlungswirksames Stoßlüften in der Simulation größere Rolle als in der ÖNORM-Berechnung spielt. In der Simulation wird der Verlauf der Kurve durch Stoßlüften in den Morgen- und Abendstunden signifikant verändert. Stoßlüften findet in der Norm keine Berücksichtigung.

In der Simulation kommt es bei den Projekten in den Nachmittags- und Abendstunden zu höheren Temperaturen. Trotz dieser kurzzeitigen Temperaturspitzen weisen die Projekte durch das Stoßlüften in den Abendstunden, sobald ein kühlungswirksames Lüften möglich ist, ein verträglicheres Raumklima als in der ÖNORM-

Berechnung auf. Die Temperatur sinkt dann relativ schnell ab.

Bei allen Projekten ist die operative Temperatur in der Nacht in der ÖNORM-Berechnung niedriger. Die Temperatur sinkt bei den ÖNORM-Berechnungen nachts bis auf unter 20 °C ab. Es ist nicht realistisch die Fenster in der Nacht durchgehend ganz zu öffnen, wenn dies zu einer Unterschreitung der Solltemperatur führt, auch unter der Beachtung von Einbruchs- und Schallschutz. Dieser Umstand könnte die realen Gegebenheiten verfälschen.

Es ist erkennbar, dass sich die ÖNORM-Berechnung mit geöffneten Fenstern eher an die Simulation annähert, als die Berechnung mit gekippten Fenstern, obwohl in der Simulation die Fenster in den Nachtstunden länger gekippt als offen sind. Bei zwei Projekten liegt die maximale Temperatur der ÖNORM-Berechnung mit offenen Fenstern über der maximalen Temperatur der Simulation. Dies steht im Widerspruch zueinander.

Bei Projekten, die vom Standard abweichen, wie beispielsweise die Lärmschutzloggia in Projekt 4, ist der Nachweis laut ÖNORM nicht zuverlässig möglich, da die Berechnung keinen Raum für derartige Abweichungen lässt. Die Gegebenheiten sind mittels Normberechnung schwierig abzubilden, da es keine Möglichkeit der vollständigen Berechnung mit Verglasungsbauteilen, welche nicht mit der Außenluft in Verbindung stehen, gibt.

Es zeigt sich, dass der Einflussfaktor Lüftung sowohl in der ÖNORM-Berechnung als auch in der Simulation hohe Auswirkungen auf das Raumklima hat. Die Kühlungswirksamkeit der natürlichen Lüftung ist schlussendlich abhängig von den Außenklimabedingungen.

Die Normsommeraußentemperatur soll die Außenklimazustände eines durchschnittlichen Sommers abbilden. Theoretisch wäre es also zumutbar, dass es an 13 Tagen mindestens zu der operativen Temperatur laut der Berechnung kommt. Bei einer Simulation über den ganzen Sommer werden diese 13 Tage bei zwei Objekten überschritten. Bei Projekt 5, wo die Normsommeraußentemperatur als sehr niedrig angenommen wird, wird die Maximaltemperatur laut ÖNORM-Berechnung an 21 Tagen überschritten.

Die Normsommeraußentemperatur bezieht sich auch in der neuen Fassung der OIB-Richtlinien 2019 auf die Periode 1981-2000. Seit 2000 wird die Abweichung in der Klimaveränderung als besonders stark angesehen. Der generierte Außenlufttemperaturverlauf für die Simulation bezieht sich auf die Periode 2000-2009. Mit dem aktuellen Klima könnte der im vorherigen Absatz beschriebene Effekt noch verstärkt auftreten und die passive Lüftung durch Kühlung wäre durch das geringere Wärmeabfuhrpotenzial weniger möglich.

Anmerkungen für die weitere Evaluierung der ÖNORM B8110-3

Der Ansatz der ÖNORM B8110-3 für die Fensterlüftung „offen“ erscheint zu stark abstrahiert, da dies kein realistisches Nutzerverhalten darstellt. Aufgrund des großen Einflusses der Fensterlüftung auf die Temperaturentwicklung sollte darauf in der ÖNORM ein größeres Augenmerk gelegt werden. Vor allem wenn man bedenkt, dass auch zukünftig erhöhter Energieverbrauch durch aktive Kühlung vermieden werden sollte. Eine Möglichkeit wäre, zwischen gekippten und geöffneten Fenstern zeitlich zu unterscheiden und anstatt des starken Temperaturabfalls während der Nachtstunden ein Stoßlüften in den Morgen- und Abendstunden einzubinden. So könnte das Fehlerpotenzial verringert werden.

Die Monatsmitteltemperaturen in der Norm ÖNORM B 8110-5:2019, die die Grundlage für den Heizwärmebedarf sind, wurden in der letzten Neuerung der Normenreihe Wärmeschutz im Hochbau angepasst, die Grundlage für den immer wichtiger werdenden sommerlichen Wärmeschutz jedoch nicht. Vor dem Hintergrund des Klimawandels wäre eine Anpassung der Normsommeraußentemperatur denkbar.

Empfehlung für den Wohnbau

Da die Nachweisführung durch die Temperaturveränderungen und Zunahme der Hitzetage zukünftig noch mehr zum Thema werden wird, ist eine Simulation bei Abweichungen bezgl. Nutzung, Verschattung und Luftzufuhr beim derzeitigen Stand der Norm durchaus empfehlenswert.

Im Wohnbau könnten die Mieter vermehrt darauf hingewiesen werden, die Fensterlüftung zu bestimmten Zeiten jedenfalls einzuhalten. Gemäß den Simulationsergebnissen wirkt sich ein Stoßlüften in den Morgen- und Abendstunden nachhaltig auf das Raumklima aus, und ist auch bezüglich des Einbruchs- und Schallschutzes verträglich.

LITERATUR

Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R. et al. (2007). HISTALP—historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. *International Journal of Climatology*, 27(1), 17–46. <https://doi.org/10.1002/joc.1377>

EQUA Simulation AB. (2018). IDA ICE (Version Version 4.8 SP1) [Computer software]. Stockholm: EQUA Simulation AB. Verfügbar unter www.equa.se

Experten (2019). Experteninterview zur Nachweisführung über sommerliche Überwärmung im Wohnbau. Mitarbeiter eines gemeinnützigen Wohnbauträgers in Salzburg. Salzburg, 10.12.

Ferk, H., Rüdiger, D., Riederer, G. & Majdanac, E. (2016). Sommerlicher Wärmeschutz im Klimawandel, Einfluss der Bauweise und weiterer Faktoren. Zuschnitt Attachment - Sonderthemen im Bereich Holz, Holzwerkstoff und Holzbau. proHolz Austria.

Kropf, S. & Zweifel, G. (2001). Validation of the Building Simulation Program IDA-ICE According to CEN 13791 „Thermal Performance of Buildings-Calculation of Internal Temperatures of a Room in Summer Without Mechanical Cooling-General Criteria and Validation Procedures“. Hochschule Technik+ Architektur Luzern. HLK Engineering.

Land Salzburg. (2020). SAGISonline. Salzburger Geographisches Informationssystem. Zugriff am 16.04.2020. Verfügbar unter <https://www.salzburg.gv.at/landkarten>

OIB. (2015). OIB-Richtlinie 6, Energieeinsparung und Wärmeschutz (Ausgabe März 2015).

OIB. (2019). OIB-Richtlinie 6, Energieeinsparung und Wärmeschutz (Ausgabe April 2019).

Norm, ÖNORM B 8110-3:2012 (15.03.2012). Wärmeschutz im Hochbau - Teil 3: Vermeidung sommerlicher Überwärmung.

Normentwurf, ÖNORM B 8110-3:2018 (01.09.2018). Wärmeschutz im Hochbau - Teil 3: Ermittlung der operativen Temperatur im Sommerfall (Vermeidung sommerlicher Überwärmung).

Norm, ÖNORM B 8110-5:2019 (15.03.2019). Wärmeschutz im Hochbau - Teil 5: Klimamodell und Nutzungsprofile.

SIA 2024-2015 (2015). Raumnutzungsdaten für Energie- und Gebäudetechnik. Zürich.

Umweltbundesamt GmbH. (2019). Anpassung an den Klimawandel in Österreich. Weiterentwickeltes Konzept für die Fortschrittsdarstellung. Wien: Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus.

Zehentmayer Software GmbH. (2020). GEQ. Energieausweis (Version Version 2020.3) [Computer software]. Salzburg: Zehentmayer Software GmbH. Verfügbar unter <https://www.geq.at/>

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. (2020). Informationsportal Klimawandel – Neoklima. Gemessene Klimaschwankungen aus 250 Jahren. Zugriff am 10.03.2020. Verfügbar unter <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informatioportal-klimawandel>

ÖKOBILANZ DES ELECTRONICS BASED SYSTEMS BUILDING AN DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT GRAZ

D. Maierhofer¹, E. Hoxha¹ und A. Passer¹

¹Arbeitsgruppe Nachhaltiges Bauen, TU Graz, Graz, Österreich

E-Mail: alexander.passer@tugraz.at

KURZFASSUNG

Diese Studie beschreibt die Ergebnisse der Ökobilanz für alle wesentlichen Gewerke des Electronics Based Systems Building (EBS) an der TU Graz. Die Ergebnisse zeigen, dass aufgrund des hohen Betriebsenergiebedarfs in einem Forschungs- und Laborgebäude, dieser rund 82% der Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahre beiträgt, was jedoch der Bilanzierung unter Annahme des derzeitigen österreichischen Strommixes geschuldet ist. Eine Szenarienanalyse zukünftiger Strommixe zeigt, dass der relative Anteil der Emissionen aus der Betriebsenergie signifikant sinken kann. Hingegen die ‚grauen‘ Emissionen im Gebäude werden mit rund 1 tCO₂-eq/m²_{NGF} errechnet und stellen nach Analyse der Szenarien einen wesentlichen Teil der Emissionen über den Lebenszyklus dar. Setzt man zusätzlich die Ergebnisse der grauen Emissionen des EBS Gebäudes in den Kontext der Gesamt-THG-Bilanz der TU Graz, indem man von einer jährlichen Neubaurate von 5.000 m²_{NGF}/a ausgeht, so sind die grauen Emissionen des Neubaus von Gebäuden für rund 18% der gesamten jährlichen THG-Emissionen der TU Graz verantwortlich. Aufgrund der angestrebten Dekarbonisierung in der Strombereitstellung werden die grauen THG-Emissionen von Gebäuden daher relativ wichtiger.

ABSTRACT

This study outlines the results of the life cycle assessment for all essential parts of the Electronics Based Systems Building (EBS) at Graz University of Technology. The results show that, due to the high operating energy demand in a research and laboratory building, the operating energy demand is responsible for about 82% of the greenhouse gas emissions over a period of 50 years. Nevertheless, a scenario analysis of future electricity mixes shows that the relative share of emissions from operating energy decreases significantly. In contrast, the grey emissions in the building are determined to be around 1 tCO₂-eq/m²_{NFA} and, according to the analysis of the scenarios, represent a substantial part of the emissions over the building's life cycle. If the results of the grey



Abbildung 1: Darstellung des EBS Gebäudes
(Quelle: AWG Architektur ZT GmbH)

emissions of the EBS building are additionally put into the context of the overall GHG accounting of the Graz University of Technology by assuming an annual new construction rate of 5.000 m²_{NFA}/a, the grey emissions of new building construction are responsible for about 18% of the total annual GHG emissions of the Graz University of Technology. Due to the decarbonisation of the electricity sector, the grey GHG emissions of buildings are becoming relatively more important.

EINLEITUNG

In Anbetracht der globalen Klimakrise und eines bevorstehenden disruptiven Zerfalls der auf fossilen Energieträgern aufbauenden Wirtschaftssysteme ist sich die TU Graz ihrer Rolle als vordenkende Zukunftswerkstätte der Gesellschaft bewusst und will mit ihrer vielfältigen technisch-wissenschaftlichen Expertise einen Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung leisten. Als nachhaltige Universität ist die TU Graz Vorbild, Motor und Multiplikator für die Gestaltung zukunftsfähiger Lösungen zur nachhaltigen Entwicklung und bekennt sich zur Umsetzung der UN Agenda 2030-Ziele (Sustainable Development Goals – SDGs) (TU Graz, 2020).

Elementarer Bestandteil der Aktivitäten des Nachhaltigkeitsbeirats der TU Graz ist die regelmäßige Bilanzierung der Treibhausgasemissionen (THG-Bilanz), die als Bezugsbasis und Kontrollinstrument für Maßnahmen

dient, um die TU Graz bis zum Jahr 2030 weitestgehend Klimaneutral auszurichten. Zur Erreichung der Ziele wurde bereits 2017 die Arbeitsgruppe Nachhaltiges Bauen beauftragt, alle Standorte der TU Graz hinsichtlich des Energieverbrauchs für Strom, Heizung und Mobilität, des Treibstoff- und Materialeinsatzes sowie der Menschen in einer so genannten Treibhausgasbilanz (THG-Bilanz) zu bewerten. Diese THG-Bilanz der TU Graz wurde im THG-Bericht 2017 veröffentlicht (Maier et al., 2020).

Eine Bewertung der grauen THG-Emissionen aus der Gebäudeerrichtung war bis dato in der Methodik zur THG-Bilanzierung von Universitäten nicht vorgesehen (Getzinger et al., 2019). Angesichts der Tatsache, dass der Gebäudesektor für rund 40% der Treibhausgasemissionen (CCCA, 2020) verantwortlich ist und hinsichtlich Universitätsgebäuden in der Literatur kaum Studien existieren (Röck et al., 2020), um Aussagen zu deren Treibhausgasemissionen zu treffen, zeigte die TU Graz vertieftes Interesse an der Bilanzierung eines eigenen Referenzgebäudes.

Die Autoren wurde daher von der OE Gebäude und Technik mit der Forschungsaufgabe betraut, die Umweltwirkungen eines neu errichteten Universitätsgebäudes, d.h. der betrieblichen sowie auch der grauen Emissionen, zu bewerten. Dafür wurde als Referenzgebäude das Electronics Based Systems Building (EBS) gewählt (siehe Abbildung 1). Dieses Gebäude wurde aufgrund seiner 'state of the art'-Baumethode mit Stahlbeton und Wärmedämmverbundsystem sowie der installierten gebäudetechnischen Anlagen als repräsentatives Referenzgebäude erachtet und soll der Ableitung zukünftiger Optimierungsstrategien hinsichtlich der Reduktion der THG-Emissionen dienen.

ÖKOBILANZIERUNG

Um die Umweltauswirkungen des Referenzgebäudes EBS zu bewerten, wurde eine Ökobilanz (LCA) nach EN 15978 (CEN/TC 350, 2011) durchgeführt. Die Systemgrenze für den Gebäudeumfang umfasst die nach ÖNORM B1801 definierten Bereiche 'Bauwerk-Rohbau' und 'Bauwerk-Ausbau' sowie die Gebäudetechnischen Anlagen (HVAC) und elektrischen Installationen. Die beiden letzteren sind lt. ÖNORM B1801 in 'Bauwerk-Technik' einzugliedern. Für diese Studie wird die Bezugseinheit m² verwendet. Dabei wird die Nettogeschossfläche (NGF) von rund 4.200 m² betrachtet. Die Systemgrenzen, die die verschiedenen Phasen im Lebenszyklus von Gebäuden unterscheiden, werden auf der Grundlage des Modularitätsprinzips nach EN 15978 definiert. Dies bedeutet, dass die Einheitsprozesse, die die Umweltleistung des Gebäudes während seines Lebenszyklus beeinflussen, dem Modul im Lebenszyklus zugeordnet werden, in dem sie auftreten. Die in dieser Studie durchgeführten LCA umfasst alle relevanten

ANGABEN ZUM LEBENSZYKLUS DES GEBÄUDE														ERGÄNZENDE ANGABEN		
HERSTELLUNGSPHASE			BAU-PROZESS-PHASE		NUTZUNGSPHASE							ENTSORGUNGSPHASE		POTENZIELLE VORTEILE & BELASTUNGEN		
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
Reisstoffbeschaffung	Transport	Produktion	Transport	Errichtung/ Einbau	Nutzung	Instandhaltung	Instandsetzung	Austausch	Modernisierung	Energieverbrauch im Betrieb	Wasserverbrauch im Betrieb	Rückbau/Abriß	Transport	Abfallbehandlung	Beseitigung	Wiederverwertung, Rückgewinnung, Recycling
✓	✓	✓	✓	✓					✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	

Abbildung 2: Berücksichtigte Lebenszyklusmodule für das EBS Gebäude

Lebenszyklusmodule, welche in Abbildung 2 dargestellt sind.

Das funktionale Äquivalent, definiert anhand der Methode nach PEF4Buildings (VITO, KU Leuven, & TU Graz, 2018) ist ein Bürogebäude mit speziellen elektronischen Laboreinrichtungen, inklusive haustechnischen und elektrischen Installationen, das über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren untersucht wird und anhand der Quantitäten der letzten Ausschreibungsunterlagen in Bezug auf das gesamte Gebäude bewertet wurde (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Hauptaspekte des Funktionalen Äquivalents

FUNKTIONALES ÄQUIVALENT	
What?	Ein Bürogebäude mit speziellen elektronischen Laboreinrichtungen, inklusive haustechnischen und elektrischen Installationen, unter Ausschluss der Außenanlagen.
How much?	Ein Bürogebäude mit speziellen elektronischen Laboreinrichtungen mit einer Nettogeschossfläche von 4.204,20 m ² .
How well?	Ein Bürogebäude mit speziellen, auf Elektronik basierenden Laboreinrichtungen, das nach dem aktuellen Stand der Technik und unter Einhaltung der geltenden Vorschriften zur Energieeffizienz gebaut wurde.
How long?	50 Jahre Betrachtungszeitraum

SACHBILANZ

Die Ergebnisse der Sachbilanz stellen einen Überblick über die im Lebenszyklus des EBS benötigten Materialien, Transporte, Energie etc. dar. Zur besseren Vergleichbarkeit und zur Verwendung in weiteren Untersuchungen für die TU Graz werden die Werte pro Quadratmeter Nettogeschossfläche beschrieben.

Für das Modul A1-A3 kann eine Gesamtmaterialmenge von rund 2.620 kg/m²NGF festgestellt werden. Im Modul A4 ergibt die Gesamttransportmenge 7,22 km/m²NGF, während im Modul A5 die Menge des in Baumaschinen eingesetzten Dieselmotorkraftstoffs 1,07 l/m²NGF und der Strom für die Baustelle 14,24 kWh/m²NGF ergibt. Die Erneuerungen im Modul B4 ergeben 102 kg/m²NGF ersetztes Material im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren.

Ein wesentlicher Teil der Sachbilanz ist die Betriebsenergie. Diese besteht lt. EN 15978 aus den Energien in den Untermodulen B6-1 (Gebäudebezogene Energienutzung lt. EN 15603), B6-2 (Gebäudebezogene Energienutzung, die nicht unter EN 15603 fällt) sowie B6-3 (Nicht auf das Gebäude bezogene Energienutzung). Die Betriebsenergie ergibt sich im Falle des EBS Gebäudes zu 289 kWh/m²_{NGFA} und setzt sich zusammen aus der Heizung via Wärmepumpe (22,45 kWh/m²_{NGFA}; B6-1), Heizung via Fernwärme (8,85 kWh/m²_{NGFA}; B6-1), Kühlung (122,16 kWh/m²_{NGFA}; B6-1), Belüftung (27,63 kWh/m²_{NGFA}; B6-1), Wasser (Heizung, Antrieb, Pumpen; 3,86 kWh/m²_{NGFA}; B6-1), sonstige Haustechnik (Befeuchtungszonen und Server, Vakuumpumpe; 2,47 kWh/m²_{NGFA}; B6-1), Beleuchtung und elektrische Geräte (48,63 kWh/m²_{NGFA}; B6-1), Aufzug und Notfalldienste (2,08 kWh/m²_{NGFA}; B6-2) sowie der Server-Farm (51,05 kWh/m²_{NGFA}; B6-3). Da es sich bei diesen Werten um Planungsangaben handelt, kann Energiebedarf des Gebäudes in der tatsächlichen Nutzung des Gebäudes variieren. Ebenso wären hier Allokationsfragen (z.B. Server-Farm) zu diskutieren und abzugrenzen. Um in Zukunft genaue Angaben für die Betriebsenergie zu erhalten, sollen Simulationswerkzeuge des Building

Information Modellings (BIM) zur Anwendung kommen, wie dies in zahlreichen Studien bereits durchgeführt wird (Obrecht et al., 2020).

Der Wasserverbrauch in der Betriebsphase im Modul B7 ergibt sich zu 0,24 m³/m²_{NGF}.

In Bezug auf das End-of-Life werden die Ergebnisse für den Transport in Modul C2 mit 1,98 km/m²_{NGF} und die Menge der Materialien, die sortiert, deponiert, verbrannt, wiederverwendet und recycelt werden, mit 2.620 kg/m²_{NGF}, 174 kg/m²_{NGF}, 40 kg/m²_{NGF}, 0 kg/m²_{NGF} bzw. 2.406 kg/m²_{NGF} errechnet. Zu erwähnen ist hier, dass die Prozesse des Wiederverwendens und des Recyclings im Modul D stattfinden und somit außerhalb der gewählten Systemgrenz für diese Studie liegen.

ERGEBNISSE

Für die Ergebnisanalyse werden die ökologischen "Hotspots" des Gebäudes auf Gebäudeebene bewertet. Die Ergebnisse der THG-Emissionen je Lebenszyklusmodul werden in Abbildung 3a dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass der betriebliche Energiebedarf in Modul B6 unter Anwendung eines durchschnittlichen

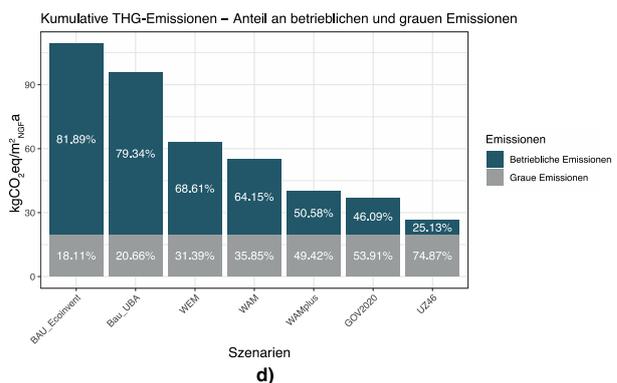
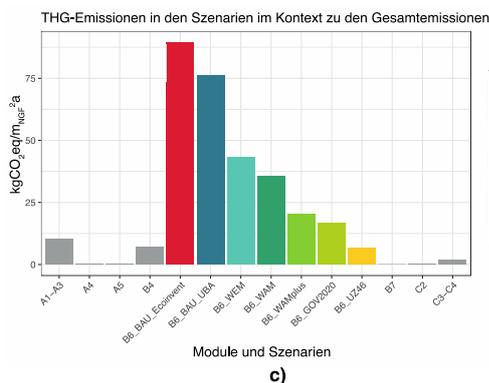
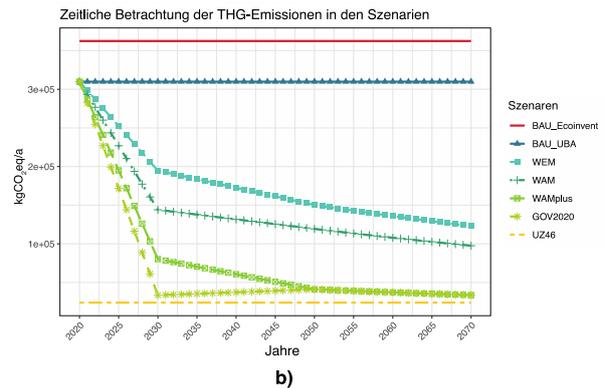
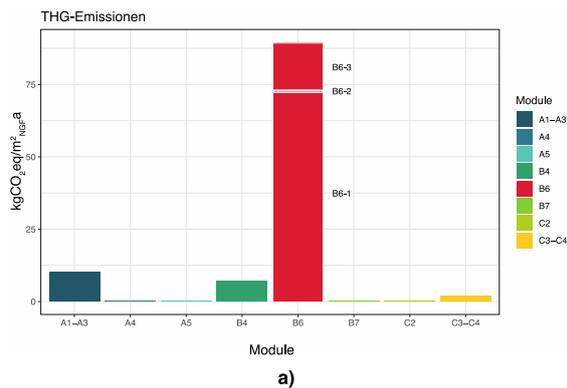


Abbildung 3:

- a) THG-Emissionen des EBS Gebäudes je Lebenszyklusmodul mit statischem Strommix in Modul B6 (inkl. Darstellung B6-1, B6-2 und B6-3)
- b) Unterschiedliche Szenarien für die zeitliche Entwicklung des Strommixes in Österreich
- c) Unterschiedliche Szenarien für Modul B6 im Kontext zu den Emissionen in den einzelnen Modulen
- d) Kumulative Emissionen über die RSP von 50 Jahren sowie der jeweilige relativer Anteil der betrieblichen und grauen Umweltwirkungen

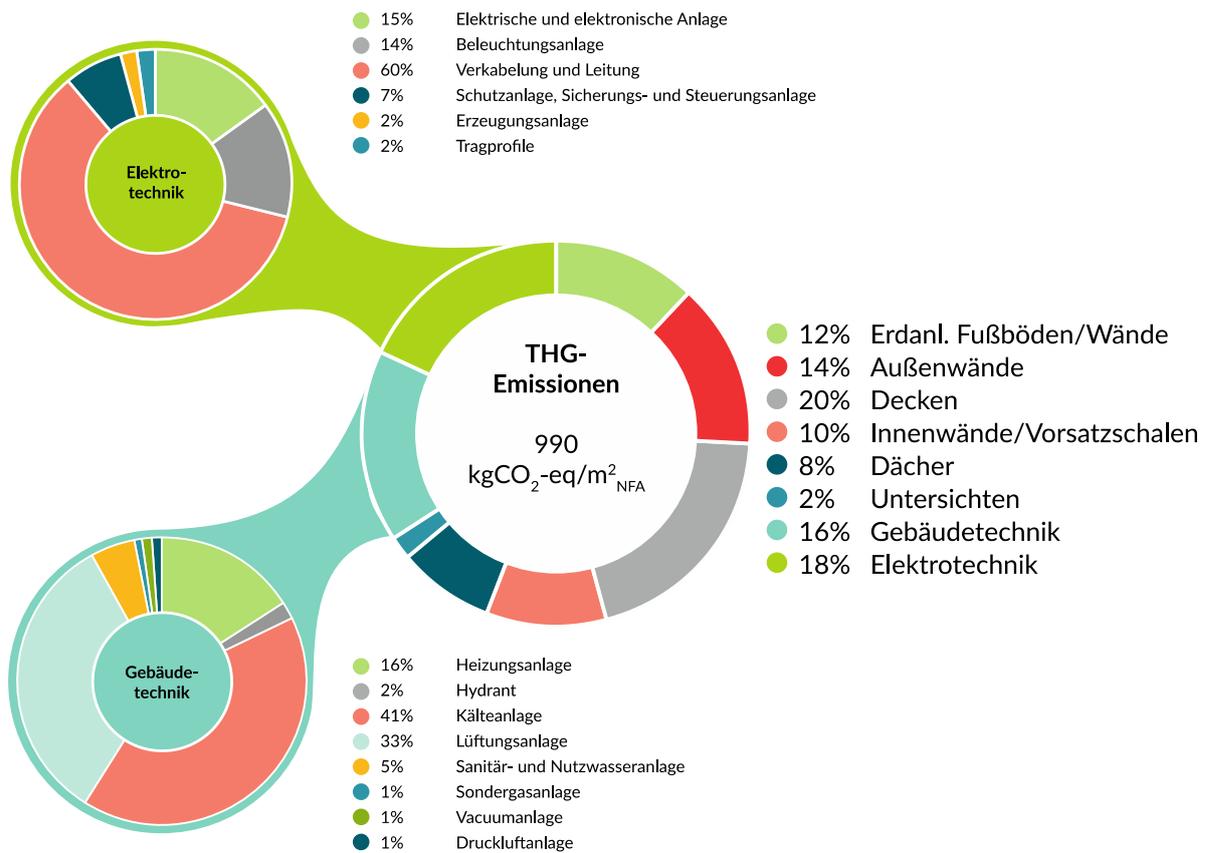


Abbildung 4: Verteilung der grauen THG-Emissionen im EBS Center, aufgeteilt in ‚Bauwerk-Rohbau‘ und ‚Bauwerk-Ausbau‘ (Großer Kreis) und ‚Bauwerk-Technik‘ (zwei kleine Kreise) (siehe auch (Maier et al., 2020))

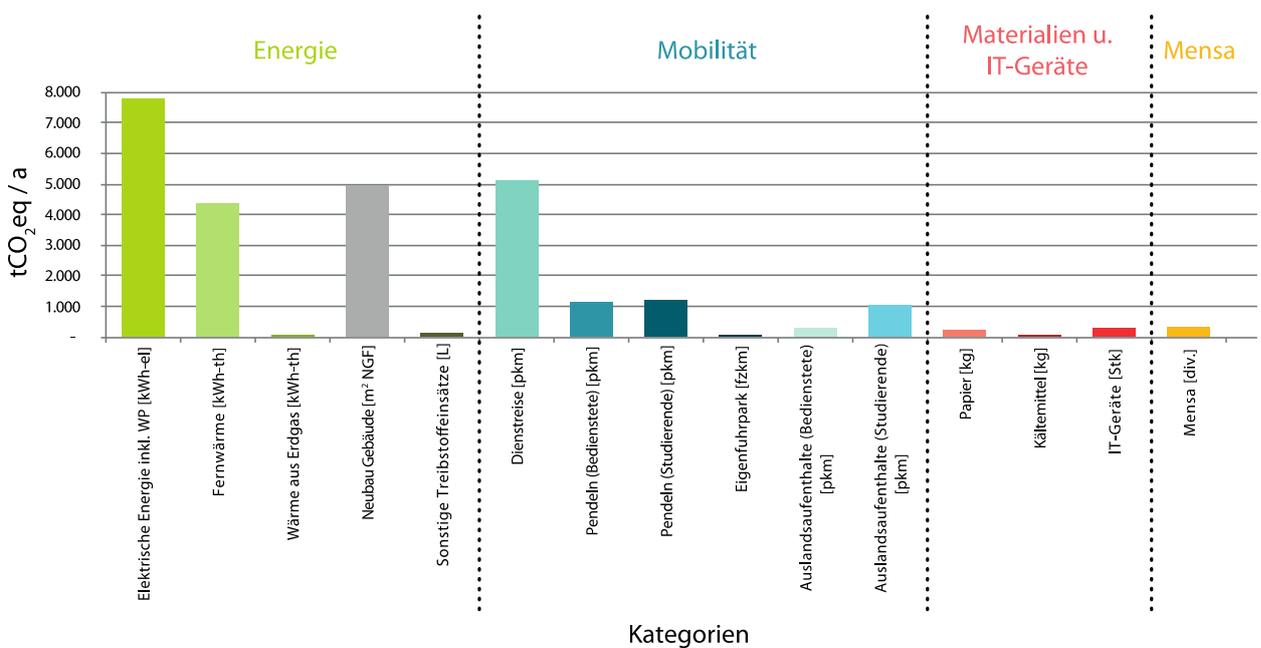


Abbildung 5: THG-Bilanz der TU Graz für das Jahr 2017 - inklusive Neubau Gebäude (graue Säule) (aufbauend auf (Maier et al., 2020))

österreichischen Energiemixes (IEA, 2017) mit etwa 82% den den größten Anteil an den Umweltauswirkungen aufweist, wobei hier zu beachten ist, dass ein statischer Energiemix über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren angesetzt ist. Betrachtet man den österreichischen Energiemix heute - wie für diese Studie herangezogen - so ist dieser nach wie vor abhängig von Importen aus Nachbarländern, die einen signifikanten Anteil an nicht erneuerbaren Energien enthalten.

In Anbetracht der derzeitigen Bemühungen auf europäischer und globaler Ebene hinsichtlich eines Übergangs zu erneuerbaren Energien, der zur Erreichung internationaler Klimaziele unabdingbar ist, ist diese Annahme sicherlich mit einem hohen Maß an Unsicherheit verbunden. Auch die Höhe des angegebenen Energieverbrauchs des Gebäudes wurde wie bereits erwähnt aufgrund der Angaben der Planung berücksichtigt und kann in der tatsächlichen Nutzung des Gebäudes durchaus stark abweichen.

Daher wurde im Zuge der Studie eine Untersuchung unterschiedlicher Szenarien für die Emissionsreduktion zukünftiger Energiemixe der in der Betriebsphase verwendeten elektrischen Energie durchgeführt. Die Szenarien basieren mehreren Publikationen zur Zukunft der österreichischen Energielandschaft (Baumann & Kalt, 2017; Die neue Volkspartei & Die Grünen - Die Grüne Alternative, 2020; Krutzler et al., 2015; Österreichisches Umweltzeichen, 2018; Umweltbundesamt, 2017). Die Ergebnisse dieser Szenarien sind in Abbildung 3b (zeitliche Entwicklung) und Abbildung 3c (Emissionen in den einzelnen Szenarien) ersichtlich. Entscheidend aus dieser Analyse ist die Erkenntnis, dass mit der zukünftigen Abnahme der Emissionen aus der Betriebsenergie durch den sukzessiven Ausbau erneuerbarer Energiequellen, der relativ betrachtete Anteil der grauen Emissionen an den Gesamtemissionen von rund 20% auf rund 75% steigen kann und somit sukzessive an Bedeutung gewinnt (siehe Abbildung 3d).

Betrachtet man aufbauend auf dieser Erkenntnis und deren zukünftiger Relevanz nun die grauen Umweltwirkungen des EBS-Gebäudes, so betragen diese in einer vereinfachten Betrachtung rund $1 \text{ tCO}_2\text{-eq/m}^2_{\text{NGF}}$ THG-Emissionen (siehe Abbildung 4). Den größten Beitrag dazu liefert in einer 'Top-Down' Sicht auf das Gebäude die nach ÖNORM B1801 (ASI, 2015) definierten Bereiche 'Bauwerk-Rohbau' und 'Bauwerk-Ausbau' (Gemeinsam hier nun als 'Bausubstanz (B)' bezeichnet) mit 66% Anteil an den grauen THG-Emissionen. Innerhalb der 'Bausubstanz' weisen die Decken mit etwa 20% den höchsten Beitrag zu den THG-Emissionen auf.

Nichtsdestotrotz zeigen auch Gebäudetechnikanlagen und Elektroinstallationen (lt. ÖNORM B1801 der Bereich 'Bauwerk-Technik'), die meist nicht in die

Bewertung der Ökobilanz von Gebäuden einbezogen werden (Passer et. al, 2012), einen signifikanten Anteil an den grauen Umweltwirkungen mit jeweils etwa 16% bzw. 18% Anteil (in Summe 34%) an den grauen THG-Emissionen (siehe Abbildung 6, kleine Kreise). Der rechte große Kreis der Grafik zeigt den relativen Anteil der THG-Emissionen für die Bereiche 'Bauwerk-Rohbau' und 'Bauwerk-Ausbau', die beiden kleineren Kreise links beschreiben die THG-Emissionen der Elemente in den Kategorien Gebäudetechnik und Elektrotechnik, welche beide zum Bereich 'Bauwerk-Technik' lt ÖNORM B1801 gezählt werden.

Setzt man die Ergebnisse der grauen THG-Emissionen des EBS Gebäudes in den Kontext der THG-Bilanz der TU Graz, und geht man von einer jährlichen Neubaurate von $5.000 \text{ m}^2_{\text{NGF/a}}$ aus, so ergeben die grauen Emissionen der Gebäude vereinfacht rund $5.000 \text{ tCO}_2\text{-eq/a}$ und sind somit für einen relativen Anteil von rund 18% an den gesamten jährlichen THG-Emissionen der TU Graz verantwortlich (siehe Abbildung 5). Aufgrund dieses Ergebnisses und der Tatsache, dass die TU Graz innerhalb der nächsten 10 Jahre weitere $60.100 \text{ m}^2_{\text{NGF}}$ an Gebäuden zu errichten plant, werden mit der derzeitigen Bauweise weitere $60.100 \text{ tCO}_2\text{-eq}$ THG emittiert. Daher ist es dringend notwendig entsprechende Maßnahmen zur Minderung dieser grauen Emissionen erarbeitet werden.

DISKUSSION

Im Hinblick auf die Verantwortung der Universitäten als führende Akteure in der Gesellschaft und ihr Ziel, einen Beitrag zur Bewältigung der Probleme der Menschheit im Bezug auf den Klimawandel zu leisten, müssen zweifellos Maßnahmen für die künftige Strategie der Gebäudelandchaft der Universitäten ergriffen werden. Die Autoren empfehlen daher, im Hinblick auf die zukünftige Transformation der Energielandschaft in Österreich, in einem ersten Schritt auch die grauen Emissionen von Gebäuden in die jährliche Berechnung der THG-Bilanz einzubeziehen, um diesen nicht vernachlässigbaren Anteil an Emissionen in den kontinuierlichen THG-Bilanz Ermittlungen der TU Graz aber auch der weiteren Universitäten in Österreich zu verfolgen (Allianz Nachhaltige Universitäten in Österreich - AG Nachhaltiges Bauen, 2020).

Um mögliche strategische Maßnahmen für zukünftige Bauaktivitäten an der TU Graz festzulegen, wird außerdem empfohlen, Optionen zur Minderung der grauen Treibhausgasemissionen am Beispiel des Referenzgebäudes EBS zu prüfen. Hinsichtlich der betrieblichen Auswirkungen des Gebäudes eröffnen sich folgende Optionen:

- Erhebung und Evaluierung des tatsächlichen Stromverbrauchs in der Nutzungsphase
- Bewertung des Potenzials von Photovoltaik auf dem EBS Gebäude oder auf dem Campus.

- Forcierung der Nutzung von UZ46 zertifiziertem Strom (Österreichisches Umweltzeichen, 2020)

Hinsichtlich der grauen Umweltwirkungen des Gebäudes wird empfohlen, folgenden Optionen zur Minderung der grauen Emissionen zu untersuchen:

- THG-Optimierung bzgl. der Bauproduktwahl (Betonrezepturen, Bewehrungsstahl etc.)
- THG-Optimierung bezüglich der statischen Struktur des Gebäudes,
- THG-Optimierung hinsichtlich der Wahl /bevorzugter Einsatz alternativer Bauprodukte
- Optimierungen und Einsparungen hinsichtlich der Installationsdichte (Elektro- und Gebäudetechnik)

In einem nächsten Schritt werden diese unterschiedlichen Untersuchungen zur Emissionsminderung am Referenzgebäude EBS bewertet, um das Rektorat der TU Graz sowie die Gebäude und Technik dahingehend zu beraten, strategische Maßnahmen im Hinblick auf zukünftige Bauvorhaben zu entwickeln. So kann ein wesentlicher Beitrag der TU Graz an der Erreichung von international gesetzten Nachhaltigkeits- und Klimaschutzziele geleistet werden.

Während der Erstellung dieser Studie hat auch die Österreichische Universitätenkonferenz ein uniko-Manifest für Nachhaltigkeit (Österreichische Universitätenkonferenz, 2020) veröffentlicht, in welchem ein aktiver Beitrag zur verantwortungsvollen Ressourcennutzung in den Bereichen Energie- und Ressourcenbedarf, Investitionen und Bauen, Beschaffung, Abfall und Mobilität gefordert wird. Für den Bereich "Bauen" wurde ergänzend von der Allianz Nachhaltige Universitäten in Österreich ein Positionspapier zur Errichtung von nachhaltigen Universitätsgebäuden erarbeitet (Allianz Nachhaltige Universitäten in Österreich - AG Nachhaltiges Bauen, 2020), zu welchem sich die TU Graz bekennt und damit diese Forderungen und Grundsätze bei allen künftigen Bauvorhaben verpflichtend umzusetzen plant. Die notwendigen Schritte zur Umsetzung sollen in enger Abstimmung des Rektorats und dem Nachhaltigkeitsbeirat der TU Graz erarbeitet werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Diese Studie stellt die Methodik und die Ergebnisse für die Ökobilanz des EBS Gebäudes an der TU Graz dar. Die Ökobilanz wurde dabei nach der Norm EN 15978 durchgeführt. Die Ergebnisse der Ökobilanz zeigen, dass die Betriebsenergie (Modul B6) mit dem derzeit in Österreich vorherrschenden Energiemix für den grössten Anteil der Auswirkungen verantwortlich ist, wenn dieser Energiemix für die gesamten 50 Jahre Betrachtungszeitraum angenommen wird. In einer Szenarienanalyse zukünftiger Energiemixe in

Österreich wurde jedoch gezeigt, dass sich der Anteil jener Umweltwirkungen, die sich aus der Betriebsenergie ergeben, sukzessive reduzieren kann und die grauen Umweltwirkungen im Gebäude an Signifikanz gewinnen.

Bei den grauen Emissionen des EBS Gebäudes sticht dabei die ‚Bausubstanz‘ als Hauptfaktor der Umweltauswirkungen hervor. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass auch die Auswirkungen der Elektro- und Gebäudetechnik nicht vernachlässigt werden können. Setzt man die Ergebnisse der grauen Emissionen des EBS Gebäudes in den Kontext der THG-Bilanz der TU Graz, indem man von einer durchschnittlichen jährlichen Neubaurate von 5.000 m²_{NGF}/a ausgeht, so tragen diese rund 18% zu den gesamten jährlichen THG-Emissionen der TU Graz bei. In Anbetracht dieses hohen Anteils wird empfohlen, auch die grauen Emissionen von Gebäuden in die jährliche Berechnung der THG-Bilanz der TU Graz und allgemein der Universitäten in Österreich einzubeziehen.

DANKSAGUNG

Die vorliegende Studie wurde von der OE Gebäude und Technik der TU Graz beauftragt und finanziell unterstützt. Ein besonderer Dank geht an Anatole Truong Nhu, der im Rahmen seines Gast-Forschungsaufenthalts die Gebäudebilanzierung wesentlich unterstützt hat.

LITERATUR

- Allianz Nachhaltige Universitäten in Österreich - AG Nachhaltiges Bauen. (2020). Positionspapier zur Errichtung von nachhaltigen Universitätsgebäuden. Zugriff am 15.07.2020, http://nachhaltigeuniversitaeten.at/wp-content/uploads/2020/03/2020-01-23_Positionspapier_Nachhaltiges_Bauen.pdf
- ASI. ÖNORM B 1801-1: Bauprojekt- und Objektmanagement - Teil 1: Objekterrichtung (2015). Austria.
- Baumann, M., & Kalt, G. (2017). Szenarien für Strom- und Fernwärme- aufbringung und Stromnachfrage im Hinblick auf Klimaziele 2030 und 2050, 68.
- CEN/TC 350. (2011). EN 15978 - Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method.
- Climate Change Center Austria. (2020). <https://gd.ccca.ac.at>, Zugriff am 22.03.2020
- Die neue Volkspartei, & Die Grünen - Die Grüne Alternative. (2020). Aus Verantwortung für Österreich. Vienna.
- Getzinger, G., Schmitz, D., Mohnke, S., Steinwender, D., & Lindenthal, T. (2019). Treibhausgasbilanzierung von Universitäten in Österreich. GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society, 28/4, 389–391.

- IEA. (2017). IEA World Energy Statistics and Balances. <https://doi.org/10.1787/enestats-data-en>
- Krutzler, T., Kellner, M., Heller, C., Gallauner, T., Stranner, G., Wiesenberger, H., ... Schindler, I. (2015). Energiewirtschaftliche Szenarien im Hinblick auf die Klimaziele 2030 und 2050 - Synthesebericht 2015.
- Maier, S., Getzinger, G., Passer, A., Scherz, M., Hoxha, E., Truong Nhu, A. B. D., ... Kreiner, H. (2020). Greenhouse Gas Accounting of Graz University of Technology. In EnInnov2020: 16. Symposium Energieinnovation (pp. 41–42). Verlag der Technischen Universität Graz. <https://doi.org/10.3217/978-3-85125-734-2>
- Obrecht, T. P., Röck, M., Hoxha, E., & Passer, A. (2020). BIM and LCA Integration: A Systematic Literature Review. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 5534, 12(14), 5534. <https://doi.org/10.3390/SU12145534> Österreichisches Umweltzeichen. Richtlinie UZ 46 - Grüner Strom (2018).
- Österreichische Universitätenkonferenz, (2020). https://www.uniko.ac.at/modules/download.php?key=22809_DE_O&f=1&jt=7906&cs=77DD, Zugriff am 23.03.2020
- Passer, A., Kreiner, H., & Maydl, P. (2012). Assessment of the environmental performance of buildings: A critical evaluation of the influence of technical building equipment on residential buildings. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(9), 1116–1130. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0435-6>
- Röck, M., Saade, M. R. M., Balouktsi, M., Rasmussen, F. N., Birgisdottir, H., Frischknecht, R., ... Passer, A. (2020). Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation. *Applied Energy*, 258, 114107. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.114107>
- TU Graz. (2020). Entwicklungsplan der TU Graz 2021plus - Entwurf Stand 05. Juni 2020.
- Umweltbundesamt. (2017). Energie- und Treibhausgas-Szenarien im Hinblick auf 2030 und 2050 - Synthesebericht 2017. Wien. <https://doi.org/978-3-99004-445-2>
- VITO, KU Leuven, & TU Graz. (2018). PEF4Buildings - Study on the Application of the PEF Method and related guidance documents to a newly office building (ENV.B.1/ETU/2016/0052LV) - Deliverable D3: Report on PEF study of newly built office building. <https://doi.org/10.2779/23505>

VII: Building operation and user behaviour

HIERARCHICAL MODEL PREDICTIVE CONTROL FOR COMPLEX BUILDING ENERGY SYSTEMS

M. Mork¹, A. Xhonneux¹ and D. Müller^{1,2}

¹Forschungszentrum Jülich GmbH, Institute of Energy and Climate Research, Energy Systems Engineering (IEK-10), Jülich, Germany

²RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center, Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate, Aachen, Germany

ABSTRACT

In this paper, a hierarchical Modelica-based Model Predictive Control (MPC) is presented in order to control complex building energy systems with different dynamics. The hierarchical MPC concept tackles the problem of controlling buildings with slow dynamics such as thermally activated building systems (TABS) and fast actuators such as air handling units (AHUs). It further addresses prediction errors of system disturbances (e.g. weather, occupancy) and ensures anticipation, reactivity and real-time capability. The benefits compared to single MPC, Rule-Based-Control (RBC) and Proportional-Integrative-Derivative (PID) strategies are demonstrated in simulations on nonlinear Modelica models including detailed models for solar shading and visual comfort.

INTRODUCTION

Energy consumption in building energy systems accounts for approximately 40 % of global energy consumption. Heating, ventilation and air-conditioning (HVAC) units are responsible for half of the energy consumed in buildings and hence, yield a great potential for energy savings and reduction of CO₂-emissions (Pérez-Lombard et al. 2008). Control of HVAC systems is challenging due to inherent nonlinear dynamics as well as time-varying system dynamics, set-points and disturbances (Afram & Janabi-Sharifi 2014). RBC in the form of on/ off or bang-bang control action and PID control dominate the control approaches currently implemented in building energy systems. They mainly represent inflexible corrective control concepts, which are unable to control inert systems with large time delays, to minimize energy to stay between bounds and perform badly outside the tuning conditions (Afram & Janabi-Sharifi 2014). MPC has gained a lot of attention in the building control domain and suggests great benefits compared with conventional controllers tackling the aforementioned challenges. It is capable of considering conflicting optimization goals such as energy consumption and occupant comfort, makes use of a system model for an anticipatory control concept, and handles future disturbances and time-varying building dynamics with time delays as well as thermal and technical constraints.

The practical implementation of MPC on an office building in Prague demonstrated energy consumption savings of 15 to 28 % compared to the existing control based on a heating curve (Cigler et al. 2013). Ma et al. (2012) applied the MPC concept on the operation of a large-cooling system in a university building in Merced resulting in an increase of 19 % in terms of a coefficient of performance against a reference control. The figures coincide with further energy savings of more than 20 % in a research laboratory in Illinois (Bengea et al. 2014), more than 20 % primary energy reduction in an office building in Brussels (De Coninck & Helsen 2016) and primary energy savings of 17 % for a large-scale simulation in a Swiss Office Building (Sturzenegger et al. 2016).

Apart from the aforementioned challenges, the implementation of MPC in buildings faces the complexity of different dynamics and time scales of the integrated systems, such as the rather slow and inert TABS compared to rather fast AHUs. An approach to tackle this complexity is hierarchical MPC that divides the optimization problem into levels of slow and fast dynamics with adapted prediction horizons and sampling times (Touretzky & Baldea 2016).

According to the experiences of experts regarding MPC in building control and its practical implementation, the modeling part is the most essential part of the MPC implementation, taking up most of the time and costs (Cigler et al. 2013). Findings of the large-scale building control project OptiControl-II, which studied seven months of MPC in a Swiss office building, conclude that a “framework allowing the fast generation of MPC suitable models is a key factor to the widespread adoption of MPC in building control” (Sturzenegger et al. 2016). The language Modelica (Mattsson et al. 1997) could be a potential candidate for building the basis of such a modeling framework for several reasons. Modelica is an open-source, equation-based, acausal and object-oriented modeling language with a graphical interface to connect components, which underlines its flexibility and user-friendliness (Schweiger et al. 2018). Modeling of building energy systems in Modelica is advanced by international projects such as the IEA EBC Annex 60 project, from which an open-source library emerged, the Modelica IBPSA library (Wetter & van

Treec 2017). Several research groups have used this library as the basis for extending and adapting the library, for instance, the AixLib (Müller et al. 2016). Modelica supports the Functional Mockup Interface (FMI) standard that enables model exchange or co-simulation with different simulation programs and is suitable for both simulation and optimization due to the language extension Optimica. The ongoing IBPSA Project 1 focuses, among other things, on the development of a Modelica framework and library for both design and operation of building energy systems as well as the development of translators from Building Information Models (BIM) to Modelica (Wetter et al. 2019). Both subprojects aim to increase the suitability of Modelica for a wider range of practical implementations in building control.

The studies in this work are conducted in an extended version of JModelica (Åkesson et al. 2010) which enables the derivative-based optimization of Modelica models and is capable of solving large-scale nonlinear problems. A recent work on building MPC based on JModelica implements an MPC approach for building systems with linear, time-invariant building envelope and steady-state nonlinear HVAC models (Jorissen et al. 2018). It is demonstrated in a full-year simulation on a terraced house showing approximately 12,8 % energy savings compared to a state-of-the-art RBC (Jorissen & Helsen 2019).

In this work, a multi-time scale hierarchical Modelica-based MPC concept is presented to control complex building energy systems with different dynamics. The hierarchical aspect tackles the increasing complexity of building systems and the increasing importance of storages for the energy turnaround. Storages can be both active in the form of batteries or thermal storages and passive such as TABS. The applied hierarchical concept takes into account all time scales and ensures anticipation and reactivity. Additionally, this work considers active solar shading and visual comfort in the form of a norm-based model for Venetian blinds (Fig. 1). Blinds constitute an essential part of building control as they influence visual and thermal comfort and can be controlled to regulate solar gains in winter to reduce heating energy or to avoid overheating in summer. The use of daylight compared to artificial lighting can increase comfort, satisfaction and productivity as well as reduce electrical consumption in office buildings. To the best of the author's knowledge, the detailed modeling of the blinds, which is based on tracking of the sunray paths, is novel in building MPC. Generally, the modeling of blinds is simplified and the solar heat flow into the room is mostly integrated in the form of linear dependence on the blind position or as a direct control input (Sturzenegger et al. 2016).

This work is structured as follows. First, the model generation procedure for the MPC is described. Subsequently, the hierarchical MPC approach is

outlined by describing the different layers, dynamics and the information exchange. The benefits of the approach are demonstrated and discussed in several AixLib-Modelica-simulation studies. The paper concludes with an outlook on further improvements and planned extensions of the framework.

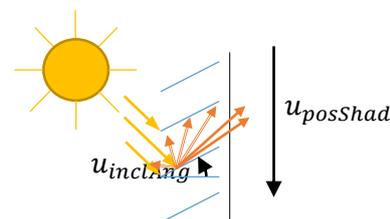


Figure 1: Draft of external Venetian blinds for solar shading incl. control inputs inclination angle $u_{inclAng}$ and vertical position $u_{posShad}$

MODEL GENERATION APPROACH

As mentioned in the introduction, the model generation is crucial for the implementation of building MPC. In this work, the existing open-source Modelica simulation library AixLib is used as a basis. The AixLib contains models of HVAC systems as well as high and reduced-order building models. An optimization library is generated by adapting the AixLib models for compatibility with the optimization framework JModelica and inherent solver IPOPT (Wächter & Biegler 2005). IPOPT is an open-source nonlinear solver capable of solving large-scale nonlinear problems. For use in IPOPT, models are required to have constraints and cost functions that are twice continuously differentiable with respect to the optimization variables. Accordingly, integer decision variables or non-finite entries in the Jacobian are not supported. Additionally, the Modelica-specific table look-up data reader CombiTimeTable is not supported in JModelica as it relies on external C code. In our framework, a data reader for external data (weather, occupancy, energy prices, etc.) based on the MPCPy framework (Blum & Wetter 2017) is integrated.

As an extension to the AixLib models, a Modelica model for active solar shading was developed that can be integrated into the AixLib window model. It models classical Venetian blinds with slats that can be controlled by adjusting the vertical position and the inclination angle of the slats. Based on the two control inputs and weather data the model calculates the total energy and light transmittance for direct and diffuse radiation. The model generation is based on norms (VDI 6007-2 (2015), DIN CEN ISO/TR 52022-2 (2018)) and considers tracking of sunray paths and varying view factors between the slat and opening surfaces as well as interactions between the glazing and shading layers. Using this model allows for consideration of visual comfort addressing e.g. recommended illuminance levels of 500 Lux in office buildings and necessary additional artificial lighting (DIN EN 12464-1 (2011)).

MPC CONCEPT

MPC makes use of a system model to predict the future system states and calculates system control inputs minimizing a cost function over the prediction horizon while considering disturbances and constraints. The calculated inputs for the first time step are applied to the real system and the MPC procedure repeats at the next sampling time step (rolling horizon). MPC tries to solve the following general optimal control problem (OCP):

$$J^* = \min_u J \quad (1)$$

subject to

$$F(t, \dot{x}, x, w, y, u) = 0 \quad (2)$$

$$g(t, \dot{x}, x, y, u) = 0 \quad (3)$$

$$h(t, \dot{x}, x, y, u) \geq 0 \quad (4)$$

$$x(0) = x_0 \quad (5)$$

In this formulation, u are the control inputs, t the time, x the states, w the disturbances and y the algebraic variables. J is the cost function to minimize with respect to the control inputs, $F()$ describes the model dynamics in a DAE form, $g()$ the equality and $h()$ the inequality constraints. Equation 5 describes the initial state condition.

To handle system dynamics and disturbances of different time scales, a hierarchical optimization strategy is used. The hierarchical MPC consists of two layers: one focusing on the slower dynamics and disturbances and one on the faster ones (Fig. 2). Slower dynamics characterize storages, both active and passive, faster dynamics arise in AHUs, convectors or radiators of lower inertia. Disturbances regarded as rather fast are e.g. occupancy or solar radiation, whereas outdoor temperature represents a rather slow disturbance. To be able to take all time scales of the overall system into account, longer prediction horizons and sampling periods are chosen for the slower MPC layer, whereas for the fast layer the horizon and sampling period are smaller. The slow layer ensures the anticipation of the control necessary for inert systems with time delay, the fast layer guarantees reactivity. A necessity for a reactive MPC can arise from forecast errors (e.g. weather or occupancy), unpredictable user influences (e.g. window/ door opening) as well as model errors and mismatches (controller model compared to the real building).

The layers communicate through interpolated state references that are calculated by the slow layer and are tracked as good as possible by the fast layer. For the slow layer, the cost function includes different forms of energy consumption, for the fast layer, it includes energy consumption and deviation from the reference state trajectories. The combination of the two layers increases the probability to preserve the real-time capability compared to a single MPC with

a long prediction horizon and small sampling periods. Real-time capability describes the ability to solve the optimization problem and to calculate a new optimal input for the next control time step within the dynamic-specific sampling period. To improve the feasibility of the problem, slack variables are introduced that penalize leaving the comfort ranges in the cost function (“constraint softening”).

The MPC layers each solve a nonlinear programming (NLP) problem due to the characteristic nonlinearities inherent in the dynamics of HVAC systems. For use in building MPC, on the one hand, a model has to be simple enough to be solved in appropriate time, on the other hand, it has to be detailed and complex enough to reproduce the dynamics of the real building. Detailed nonlinear models enable a higher exploitation of potential savings closer to the theoretical performance-bound and provide more flexibility in formulating the model equations, constraints and cost function (Drgoňa & Helsen 2018). The higher model accuracy is at the expense of higher computational demand; however, optimization algorithms and solvers are improved continuously and due to the progress and developments of processors and cloud computing the available computational power is increasing exponentially (Serale et al. 2018). Works on nonlinear MPC (Bengea et al. 2014, Touretzky & Baldea 2016) are less common compared to linear MPC, however, they can have a high potential for future high-performant control systems (Drgoňa & Helsen 2018).

The used models in this work are first-principles physical white-box models preserving the accuracy of the nonlinear models over a wider range of operating conditions compared to grey-box or black-box models. The latter highly depend on the available existing training data and perform badly outside the training conditions. Studies by Picard et al. (2017) show that MPC performance proves sensitive to the prediction accuracy of the controller. In white-box models, the parameters and state variables have a physical meaning and a geometric equivalent in contrast to general grey-box and black approaches (Drgoňa et al. 2020), ensuring their explicit location, improved comprehension of the system behavior and fault detection. The white-box approach is planned to be extended by a calibration/ parametrization module where model parameters are calculated or updated in a “parameter estimation” optimization problem based on measurement data.

After solving the optimization problem, the fast MPC layer sends the control inputs for the first control time step to a simulation model, which simulates over one sampling period. The “measured” data is sent back to both the slow and fast layer, based on which the optimization states are updated and the optimization problem is solved again for the next sampling period.

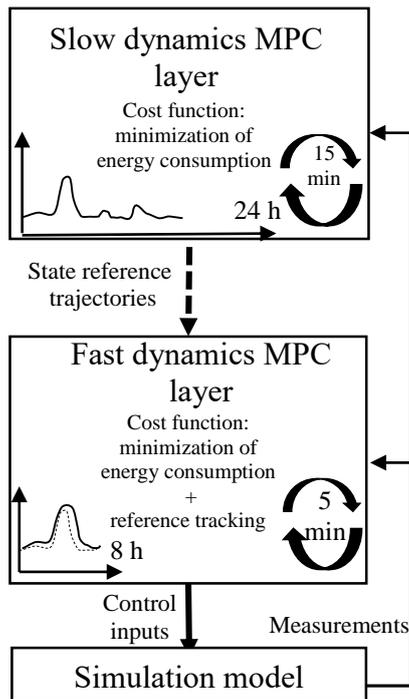


Figure 2: Overview of hierarchical MPC concept

SIMULATION

The hierarchical MPC concept is applied to a nonlinear white-box Modelica room model including TABS (realized as Concrete Core Activation (CCA) in the floor), a convector, pumps and a window with external Venetian blinds. A high-order model is chosen for the building, the wall including the window is regarded as external and the remaining walls are considered as adiabatic. The pumps supply the TABS and the convector with a water mass flow at fixed temperatures. Occupancy is considered through a model that calculates human heat emission according to typical office schedules with two occupants from 8 am - 12 pm and 1-6 pm. The MPC starts at 8 am with the beginning of the occupancy period. Weather data is included through an AixLib resource weather file for San Francisco in January 1999 (heating period). For the MPC approach, a perfect forecast is assumed.

Control inputs to the model are the heating water mass flows u_{Conv} and u_{TABS} for convector and TABS, the vertical position $u_{posShad}$ and inclination angle $u_{inclAng}$ for the blinds, accounting for thermal (air temperature comfort range 293 - 295 K) and visual comfort (minimum illuminance level of 500 lux). Artificial lighting u_{al} (luminous flux) is not modeled explicitly. The electricity demand to reach the comfort illuminance level is considered in the cost function and assumed to vary linearly with the provided artificial illuminance. The models in both MPC layers are identical and coincide with the emulator model.

The cost function for the upper, slow layer minimizes energy consumption for the convector, TABS and electrical artificial lighting and includes a quadratic penalization term for temperatures outside

the comfort range (through introduced slack variables) (Equation 6). The lower, fast layer complements these terms by reference tracking, in the form of quadratic penalization of deviation from the reference temperature states (Equation 7).

Cost function for slow layer:

$$J_{slow} = \sum_{k=0}^{N-1} \alpha_{Conv} * u_{Conv}(k) * (T_{supply,Conv} - T_{return,Conv}) + \alpha_{TABS} * u_{TABS}(k) * (T_{supply,TABS} - T_{return,TABS}) + \alpha_{Light} * u_{al}(k) + \delta * (\bar{\varepsilon}(k))^2 + \underline{\varepsilon}(k)^2 \quad (6)$$

Cost function for fast layer:

$$J_{fast} = \sum_{k=1}^N \gamma * (y_{Temp}(k) - y_{Ref,Temp}(k))^2 + \sum_{k=0}^{N-1} \alpha_{Conv} * u_{Conv}(k) * (T_{supply,Conv} - T_{return,Conv}) + \alpha_{TABS} * u_{TABS}(k) * (T_{supply,TABS} - T_{return,TABS}) + \alpha_{Light} * u_{al}(k) + \delta * (\bar{\varepsilon}(k))^2 + \underline{\varepsilon}(k)^2 \quad (7)$$

subject to

$$\underline{T}_{room,air} - \underline{\varepsilon} \leq T_{room,air} \leq \bar{T}_{room,air} + \bar{\varepsilon} \quad (8)$$

$$\underline{\varepsilon}, \bar{\varepsilon} \geq 0 \quad (9)$$

$$illum_{al} + illum_{al} = illum_{set} \quad (10)$$

In these formulations, α_{Conv} and α_{TABS} are weighting factors for the control inputs of convector and TABS including the heat capacity of water, α_{Light} a weighting factor for the energy consumption of artificial lighting, γ a penalization factor for deviations from the reference trajectory and δ a factor penalizing room temperatures outside the comfort range. ε are slack variables, quantifying temperatures outside the comfort ranges. $illum_{dl}$ is the daylight, $illum_{al}$ the artificial light and $illum_{set}$ the set-point illuminance. The slow layer has a prediction horizon of 24 h and a sampling period of 15 min, the fast layer a horizon of 8 h and a sampling period of 5 min.

To evaluate the performance of the hierarchical MPC it is compared with two other control strategies. The first strategy is a simplified combination of an RBC for solar shading and two PI-controllers manipulating the heating water mass flows of convector and TABS. The blinds are shut and closed to an inclination angle of 90° if the direct solar radiation hitting the respective façade exceeds a value of 200 W/m^2 . The parameters of the two PI controllers are tuned to show a smooth behavior with higher reactivity for the convector compared to TABS and to track the lower bound of the comfort

range. The second control strategy is a single MPC that is configured in two variations with sampling periods of 15 min and 5 min. The prediction horizon is 24 h for both variations, consequently, the latter is more reactive, but has a greater computational demand.

The MPC strategies are solved in JModelica 2.14, with IPOPT 3.13.1 and the linear HSL solver ma97 (HSL 2013). For solving the MPC problems, an OpenStack instance with a Linux machine, Ubuntu 18.04, 4 VCPUs and 24 GB RAM is used.

RESULTS

The different control strategies are compared in terms of the performance measures energy consumption, discomfort and computation time (Table 1). The performance measure for energy consumption evaluates the weighted sum of energy consumption for TABS, convector and artificial lighting. The performance measure for discomfort calculates the amount of Kelvin hours (Kh) that the indoor temperatures are outside the comfort range. Further performance measures quantify the total time spent in the optimization as well as the computational time ratio, which expresses the relation of the computation time to the sampling time. If the ratio is smaller than one, the system is real-time capable.

In Figure 3, the results for the combination of the RBC and PI-approach are depicted. During the period of higher solar radiation between hours 5 - 9 the indoor temperature exceeds the upper comfort bound. The RBC reacts at a direct solar radiation of 200 W/m² on the façade and closes the shading to minimize solar heat gains, however, due to thermal delay the room overheats at hours 5-6 and 8. The PI controllers increase the mass flows for CCA and convector during hour 10 - 24 in a reactive manner when demand arises but reach the maximum operating limits of 0,2 kg/s resulting in a slight undershooting of the temperature.

In Figure 4, the control performance of the single MPC with a sampling period of 15 min is shown. By adjusting the shading position before the peak of the direct solar radiation on the façade, it partially reduces the overheating peaks by increasing the shading position but reopens the shading too early. The inclination angle remains nearly constant for the entire period. The CCA is preheated during the first hours in such a way that the heating systems do not reach their maximum bounds, whereas the mass flow to the convector mass flow just slightly differs. At hour 20 indoor temperature slightly leaves the lower comfort bound. Compared to the RBC + PI control energy consumption is reduced by 6,9 %, but the discomfort increases by 37,0 %.

In Figure 5, the results for the hierarchical MPC are depicted. The trajectory of the indoor temperature shows very small overheating by dynamically increasing the shading position with increasing direct radiation on the façade. The inclination angle

remains nearly constant with an abnormality at hour 6. The convector mass flow starts with small values during the beginning of the period and increases slightly to a value where it remains nearly constant. Similar to the single MPC, the CCA is preheated during the beginning of the period but first, it decreases to avoid overheating. During the overheating period, the reactive fast layer follows a slightly different trajectory to avoid overheating compared with the reference trajectory. Similar to the single MPC with a sampling period of 15 min, indoor temperature undershoots the minimum comfort bound around hour 20. Compared to the RBC + PI control energy consumption can be decreased by 1,8 % and discomfort by 12,7 %.

The results for the single MPC with a sampling period of 5 min are not shown here in a figure. Using this approach, the discomfort could be reduced by 25,4 % compared to the RBC + PI approach at the expense of an increase of 12,1 % energy consumption and increased computation time of 23,4 % compared to the hierarchical approach.

The gained results apply to the studied use case but are not necessarily representative of other cases. All approaches preserve real-time capability with computational time ratios of 0,05 (single MPC with sampling of 15 min), 0,19 (single MPC with a sampling of 5 min) and 0,15 (hierarchical MPC). Accordingly, the hierarchical approach is 6 to 7 times faster than real-time.

The MPC approach was tested for different configurations of the heating systems, different MPC start times and the superimposition of sinusoidal curves to the outdoor temperature to examine the robustness of the control concept. The obtained results were similar to the ones gained in the studied case while preserving real-time capability in all cases. Different time scales for the upper and lower layer do not result in better MPC performance for the studied configuration of the heating systems and the considered simulation horizon of 24 h. Further analysis of varying time scales of the slow and fast layer for different configurations of the heating systems, consideration of forecast errors and longer simulation horizons is part of future work.

Table 1:
Comparison of performance measures for the different controls strategies (in %: compared to RBC + PI)

	Energy consumption (kWh)	Discomfort (Kh)	Computation time (s)/ratio (-)
RBC + PI	4,802	1,73	79/ ~0
Single MPC (15 min)	4,472 (-6,9 %)	2,37 (+37,0 %)	2 407/ 0,03
Single MPC (5 min)	5,382 (+12,1 %)	1,29 (-25,4 %)	16 039/ 0,19
Hierarchical MPC	4,715 (-1,8 %)	1,51 (-12,7 %)	13 002/ 0,15

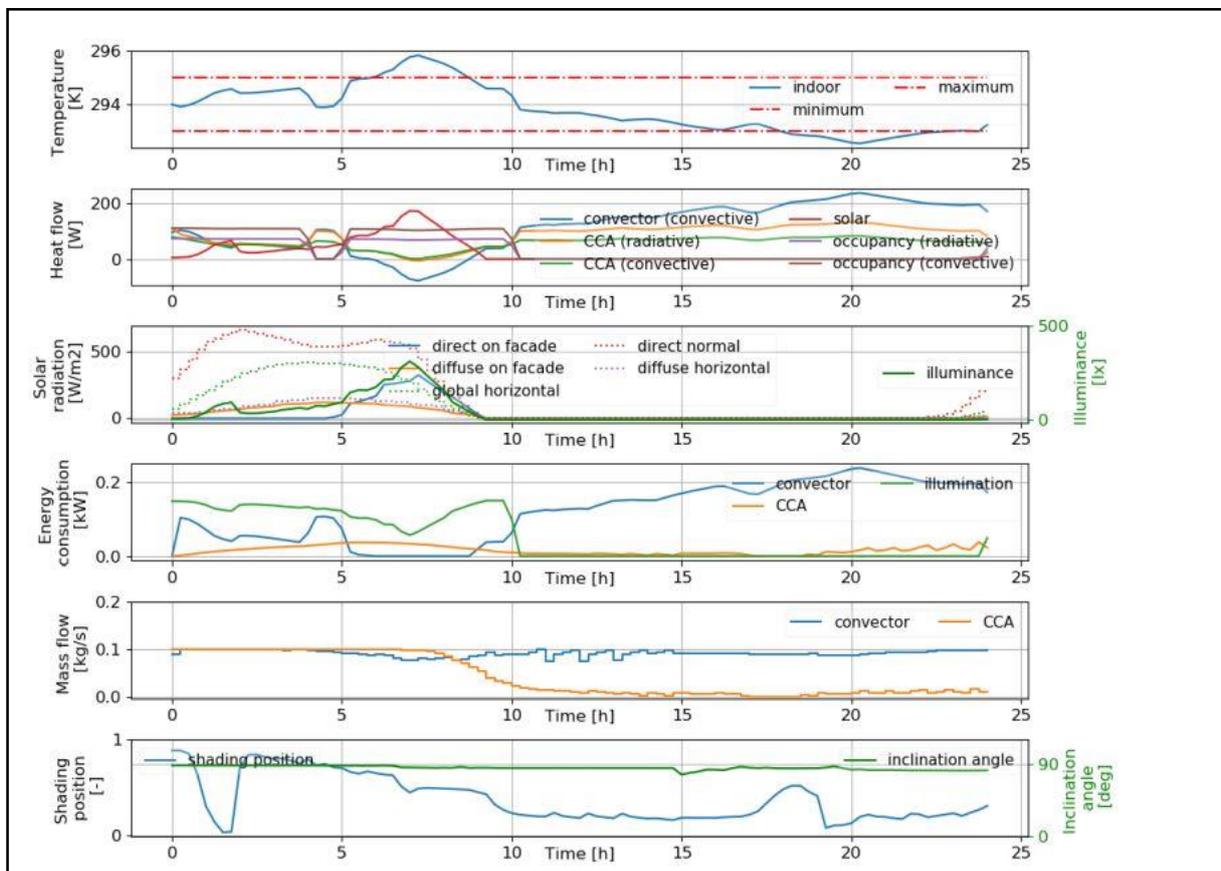
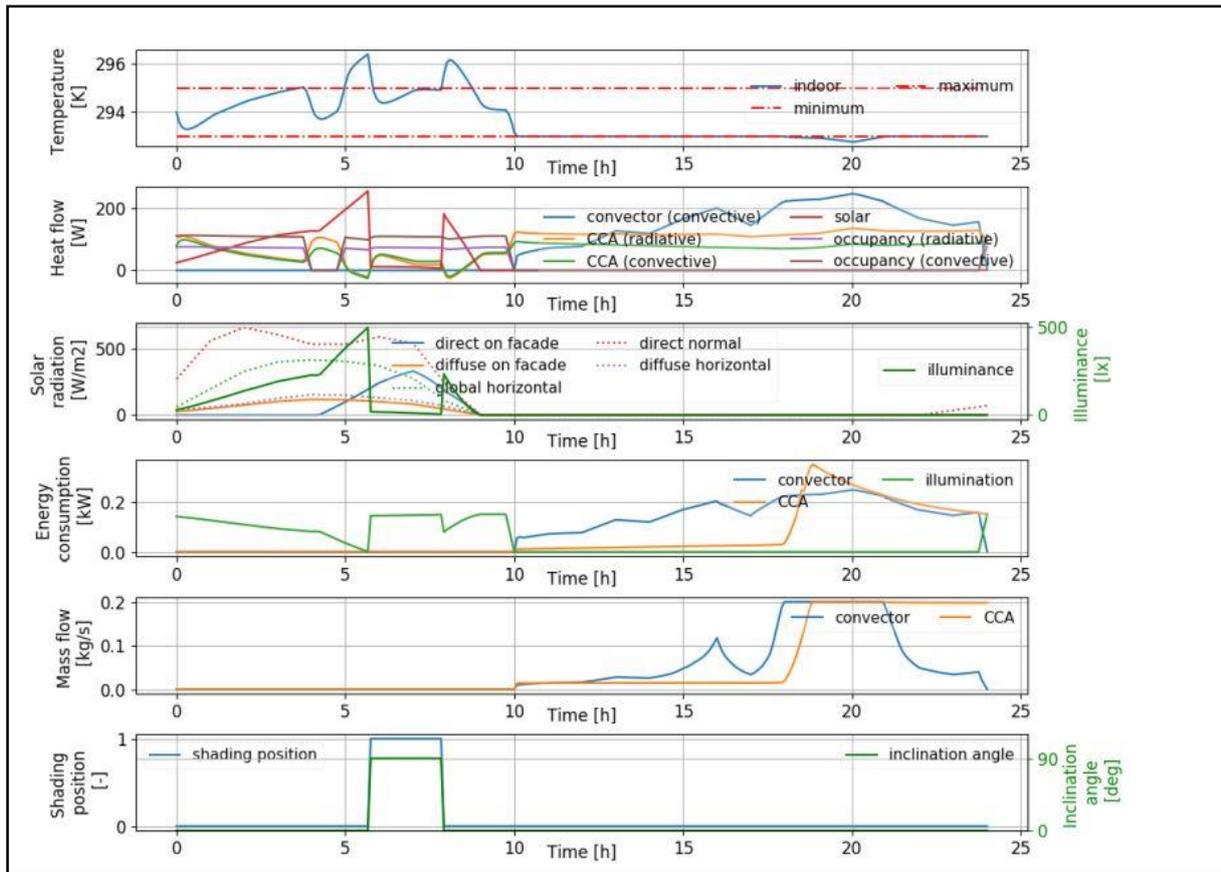


Figure 3: RBC + PI control
 Figure 4: Single MPC (sampling period of 15 min)

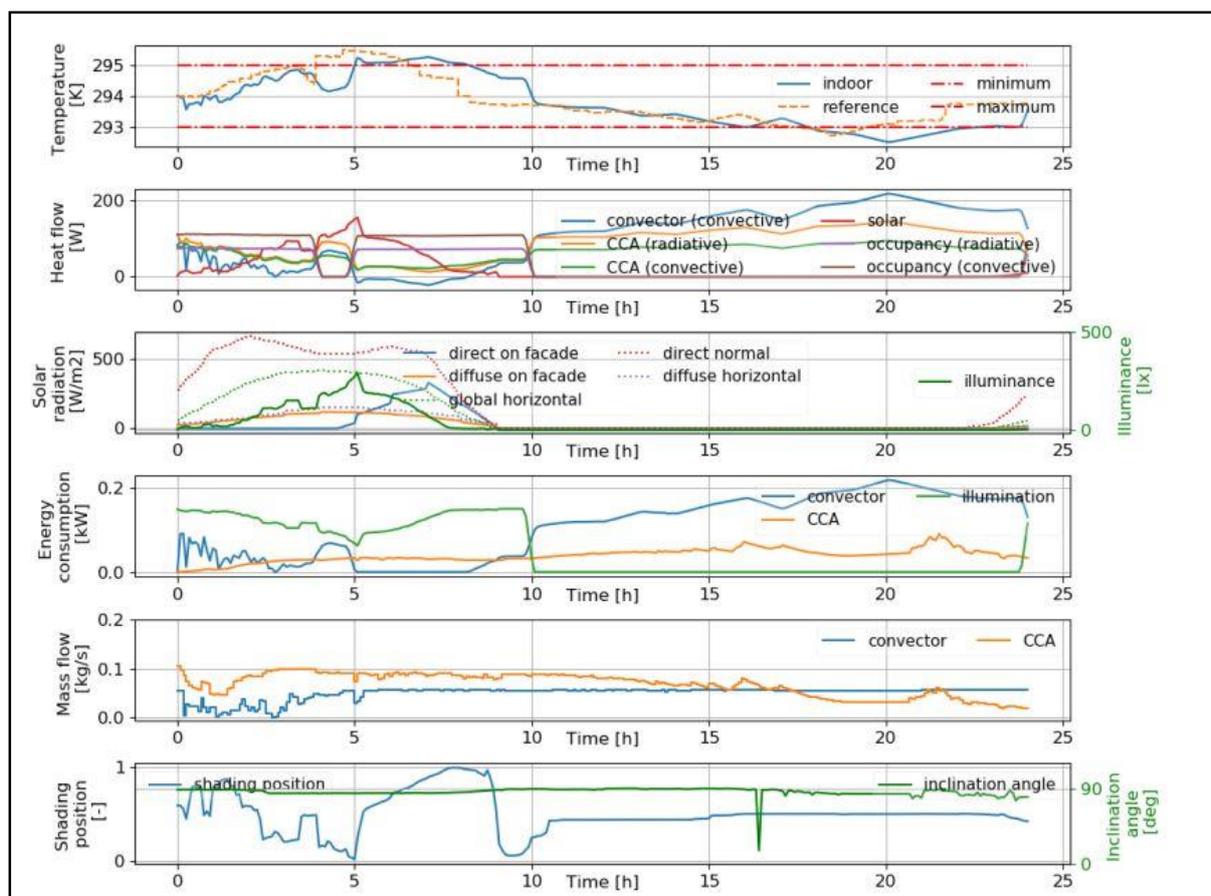


Figure 5: Hierarchical MPC

CONCLUSION

In this contribution, we present a Modelica-based hierarchical MPC approach for building energy systems with components of different dynamics. It accounts for different time scales within complex building energy systems and ensures both reactivity to forecast errors or unpredicted disturbances and anticipation for systems with time delays and high inertia. The presented approach further includes visual comfort by integrating a detailed model for active solar shading through Venetian blinds. The concept is verified on a detailed nonlinear Modelica room model including a convector, TABS and a window with integrated blinds. It is compared to a conventional RBC + PI concept and single MPCs with short and long sampling periods in terms of energy consumption, discomfort and computation time. The results demonstrate the good overall results for the proposed approach with preserved real-time capability for nonlinear Modelica models and underline the benefits of predictive control for shading blinds.

In future versions of the framework, it is planned to integrate models of different complexity for the different layers, to include more detailed comfort models (e.g. for air quality), to improve the shading control concerning user acceptance and glare, to

enable integer optimization, to consider energy prices and to implement the approach in a real building.

REFERENCES

- Afram, A. and Janabi-Sharifi, F., 2014. Theory and applications of HVAC control systems – A review of model predictive control (MPC). *Building and Environment*, 72, pp.343-355.
- Åkesson, J., Årzén, K., Gäfvert, M., Bergdahl, T. and Tummeseit, H., 2010. Modeling and optimization with Optimica and JModelica.org-Languages and tools for solving large-scale dynamic optimization problems. *Computers & Chemical Engineering*, 34(11), pp.1737-1749.
- Bengea, S., Kelman, A., Borrelli, F., Taylor, R. and Narayanan, S., 2014. Implementation of model predictive control for an HVAC system in a mid-size commercial building. *HVAC&R Research*, 20(1), pp.121-135.
- Blum, D. H. and Wetter, M., 2017. MPCpy: An Open-Source Software Platform for Model Predictive Control in Buildings. *Proceedings of the 15th Conference of International Building Performance Simulation*, Aug 7 – 9, 2017, San Francisco, CA.

- Cigler, J., Gyalistras, D., Široký, J., Tiet, V.-N. and Ferkl, L., 2013. Beyond theory: the challenge of implementing Model Predictive Control in buildings. Proceedings of 11th REHVA World Congress Clima 2013, Prague, Czech Republic, June 16-19, 2013.
- De Coninck, R. and Helsen, L., 2016. Practical implementation and evaluation of model predictive control for an office building in Brussels. *Energy and Buildings*, 111, pp.290-298.
- DIN CEN ISO/TR 52022-2 DIN SPEC 4432, January 2018. Energy performance of buildings - thermal, solar and daylight properties of building components and elements - Part 2: Explanation and justification (ISO/TR 52022-2:2017); German version CEN ISO/TR 52022-2:2017.
- DIN EN 12464-1, August 2011. Light and lighting - Lighting of work places - Part 1: Indoor work places; German version EN 12464-1:2011.
- Drgoňa, J. and Helsen, L., 2018. Different Problem Classes and Solution Techniques for Model Predictive Building Control. Proceedings of the REHVA Annual Meeting Conference Low Carbon Technologies in HVAC, 23 April 2018, Brussels, Belgium.
- Drgoňa, J., Picard, D. and Helsen, L., 2020. Cloud-based implementation of white-box model predictive control for a GEOTABS office building: A field test demonstration. *Journal of Process Control*, 88, pp.63-77.
- HSL, 2013. A collection of Fortran codes for largescale scientific computation. <http://www.hsl.rl.ac.uk>.
- Jorissen, F., Boydens, W. and Helsen, L., 2018. TACO, an automated toolchain for model predictive control of building systems: implementation and verification. *Journal of Building Performance Simulation*, 12(2), pp.180-192.
- Jorissen, F. and Helsen, L., 2019. Integrated Modelica Model and Model Predictive Control of a Terraced House Using IDEAS. Proceedings of the 13th International Modelica Conference, March, 2019.
- Ma, Y., Kelman, A., Daly, A. and Borrelli, F., 2012. Predictive Control for Energy Efficient Buildings with Thermal Storage: Modeling, Stimulation, and Experiments. *IEEE Control Systems*, 32(1), pp.44-64.
- Mattsson, S. E., Elmqvist, H. and Broenink, J. F., 1997. Modelica: An International Effort to Design the Next Generation Modelling Language. *Journal "A"*, 38(3), pp. 16-19.
- Müller, D., Lauster, M., Constantin A., Fuchs M. and Remmen, P., 2016. AixLib - An Open-Source Modelica Library within the IEA-EBC Annex 60 Framework. BauSIM 2016: Sixth German-Austrian IBPSA Conference, pp. 3-9.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J. and Pout, C., 2008. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), pp.394-398.
- Picard, D., Drgoňa, J., Kvasnica, M. and Helsen, L., 2017. Impact of the controller model complexity on model predictive control performance for buildings. *Energy and Buildings*, 152, pp.739-751.
- Schweiger, G., Heimrath, R., Falay, B., O'Donovan, K., Nageler, P., Pertschy, R., Engel, G., Streicher, W. and Leusbrock, I., 2018. District energy systems: Modelling paradigms and general-purpose tools. *Energy*, 164, pp.1326-1340.
- Serale, G., Fiorentini, M., Capozzoli, A., Bernardini, D. and Bemporad, A., 2018. Model Predictive Control (MPC) for Enhancing Building and HVAC System Energy Efficiency: Problem Formulation, Applications and Opportunities. *Energies*, 11(3), pp. 631-1 - 635-1.
- Sturzenegger, D., Gyalistras, D., Morari, M. and Smith, R., 2016. Model Predictive Climate Control of a Swiss Office Building: Implementation, Results, and Cost-Benefit Analysis. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 24(1), pp.1-12.
- Touretzky, C. and Baldea, M., 2016. A hierarchical scheduling and control strategy for thermal energy storage systems. *Energy and Buildings*, 110, pp.94-107.
- VDI 6007 - Part 2, March 2012. Calculation of transient thermal response of rooms and buildings - Modelling of windows.
- Wächter, A. and Biegler, L., 2005. On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming. *Mathematical Programming*, 106(1), pp.25-57.
- Wetter, M. and van Treeck, C., 2017. IEA EBC Annex 60: New Generation Computing Tools for Building and Community Energy Systems.
- Wetter, M., van Treeck, C., Helsen, L., Maccarini, A., Saelens, D., Robinson, D. and Schweiger, G., 2019. IBPSA Project 1: BIM/GIS and Modelica framework for building and community energy system design and operation - Ongoing developments, lessons learned and challenges. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 323, no. 1, 012114.

PREDICTION OF WINDOW HANDLE STATE USING MACHINE LEARNING

M. Vollmer¹, M. Langer¹, F. Banihashemi¹, H. Harter¹,
D. Kierdorf¹ and W. Lang¹

¹Institute of Energy Efficient and Sustainable Design and Building, TU Munich, Munich, Germany

ABSTRACT

The project described in this paper investigates the energy-relevant behavior of window control actions of the occupants of an office building in Regensburg, Germany as a case study. The extensive data monitoring regarding energy consumption, indoor as well as outdoor climate, and window control actions (state of the window handle) started in 2017.

Different machine learning classification algorithms are used together with the measured data to train models for the prediction of window openings and closings. The procedure is designed to identify the potentials and limitations of the realistic forecasting of occupant behavior based on the available data.

INTRODUCTION

The building sector plays a major role in today's strive for a more sustainable future. It is responsible for more than one-third of global resource consumption. Additionally, the energy consumption taking place in buildings represents approximately one-third of the global end-use energy consumption (Abergel et al. 2017).

Beyond the properties of the construction and the building technology, the occupants' interactions with the building control elements are relevant for the resulting energy demand. Especially the window control behavior impacts the amount of energy needed to maintain a comfortable indoor climate (Gaetani et al. 2018).

The anticipation of the window control behavior is crucial for the two application cases of thermal building simulations and building automation.

In thermal building simulations, the window control behavior is modeled according to appropriate standards or through rule-based functions e.g. according to DIN V 18599-10 (DIN, V. 18599-10: 2018-19) or DIN EN 15251 (DIN, EN 15251:2012-12). The underlying assumptions are unrealistic (e.g. natural ventilation is not considered in DIN V 18599), which leads to an inadequate representation of the true occupant indoor behavior. Thermal building simulations are often used to determine the best measures to increase energy efficiency, reduce resource consumption, and increase thermal comfort. Unrealistic modeling of the window control behavior generates a performance gap between the

estimated energy demand and the real energy consumption and there is thus no guarantee that the best possible measures are identified (Moeller et al. 2020).

In the field of building automation, the aim is to control the building technology in such a way that the occupant feels comfortable and that the energy consumption is minimized. In case of a need for fresh air at some point during the cold season, it is more efficient to use the ventilation system with heat recovery than to open the window. To prevent the occupants from opening the window, the building automation must anticipate the occupant behavior as early as practicable and adapt the indoor climatic conditions in time.

A new approach for the more realistic prediction of occupant behavior is offered by the application of machine learning algorithms. The following factors are known to influence the window opening and closing behavior: air temperature, mean radiant temperature, air velocity, relative humidity, air quality (measured by the indicator of CO₂-concentration), outdoor conditions (noise, temperature, humidity, and wind), current window state (closed, open, tilted), clothing insulation, level of activity / metabolic rate, routines, habits and mental states (Fabi et al. 2012). These aspects strongly depend on the respective person, location, and situation.

PROBLEM DEFINITION, GOAL, AND SCOPE

The goal of this study is to identify the potentials and limitations of using machine learning classifiers to detect patterns and predict the occupants' window control behavior. In accordance with the principle of Occam's Razor, it is common practice in the field of machine learning to first try the simplest approach and evaluate its performance (Sammut et al. 2010). It is therefore investigated how well machine learning models perform when the only available input variables are frequently monitored standard measurements even though it is known that a high number of additional factors influence the window control behavior. For the application of a predictive model in building automation, predictions must be made long enough in advance to ensure sufficient reaction time for the building technology. This

the prediction of window state transitions (Fabi et al. 2012).

Only by identifying future window state transitions, energetic precautions (e.g. regulation of heating and ventilation systems) can be implemented. The present study focuses on the prediction of window openings and closings.

CONVERSION INTO A MACHINE LEARNING TASK

The nature of the described problem can be assigned to the field of supervised machine learning. It is the subfield of machine learning that learns from data where the output is already known and the goal is to predict the output for unseen data (Burkov 2019). The target outcome is the action on the window handle after each minute. When a window is only slightly open, the ventilating effect may be comparable to the tilted state. For the sake of simplicity, the window state is binarized by only differentiating between the open and closed state. The possible actions after each time step are 'no action', 'window opening', and 'window closing'. Each action can be interpreted as a category, which means that the problem has to be solved by the approach of classification (Burkov 2019). Among the variables measured within the scope of the project, only the following variables are known to have an influence on the ventilation behavior and are therefore selected as input features:

- interior operative temperature (°C)
- interior air temperature (°C)
- interior relative humidity (%)
- exterior ambient relative humidity (%)
- exterior air temperature (°C)
- exterior wind speed (m/s)

In addition to the measured values, the current state of the window is included as a categorical feature. The day of the year and the minute of the day are added to cover the seasonal and daily behavioral patterns. To represent the cyclicity of these variables accordingly, they are transformed into two features respectively by applying the sine and cosine functions. The day of the week is also added as it contains information about weekly patterns and about the instance being on the weekend or not. Since the cyclicity and continuousness of the values are irrelevant in this case, the variable is transformed into a categorical feature.

All described input variables are preprocessed and combined into one feature vector with a corresponding label vector containing the classes of 'no action', 'window opening', and 'window closing'.

SELECTION OF MACHINE LEARNING ALGORITHMS

To build a model for the prediction of the target output, different machine learning algorithms from the scikit-learn library in python are tested and compared to each other in the process called 'spot-checking' (Pedregosa et al. 2011).

Based on the knowledge about the data and the problem at hand, the machine learning algorithms to be tested for suitability must meet the following requirements:

- classification algorithms capable of handling multiclass problems
- more computationally intensive algorithms (e.g. deep learning) are excluded
- able to handle large data sets of a million instances
- consider class imbalances automatically or have a built-in option for setting class weights to balanced mode

When choosing the learning algorithms to spot-check, it is good practice to pick a mixture of parametric and non-parametric algorithms, model-based, tree-based, and instance-based algorithms, linear and nonlinear functions (in case of model-based algorithms) and different learning algorithms for the same type of representation. Under consideration of all described aspects, the following machine learning algorithms are selected for the spot-checking process (Burkov 2019; Perner 2013):

- Decision Tree
- Random Forest
- Gradient Tree Boosting
- k Nearest Neighbors
- Gaussian Naïve Bayes
- Support Vector Machine with Stochastic Gradient Descent
- Logistic Regression

PERFORMANCE EVALUATION METRICS

To be able to test the performance on unseen data, the data set must be split into a training set and a holdout set (test set) with comparable properties. The usual approach to split a dataset is to shuffle the entire dataset and then split it into subsets. For the case of time series data, this approach is unsuitable. The model is only useful if it is trained exclusively on data from the past. The data set is first split while still in its chronological order. In the next step, the examples of each subset are randomly shuffled. The performance on the unseen examples of the test set is decisive for the selection of the best model.

For the quantitative performance evaluation and comparison of different models, one single decision criterion must be defined (Ng 2018). The simplest and most commonly used evaluation metric for

classification problems is the overall accuracy. It represents the ratio of correct predictions to the total number of examples (Burkov 2019). In the present classification problem, the classes are strongly imbalanced. On the entire data set 971,430 minutes are followed by the event 'no action' while opening and closing events happen only 190 times respectively. Hypothetically, a model that predicts the class 'no action' for each example (independently of the feature values) achieves an accuracy of 99.96% and all predictions for the examples of the underrepresented classes of window openings and closings are wrong. This shows that the accuracy as a single metric is insufficient for the evaluation of the models. It is thus necessary to additionally focus on the underrepresented classes. The recall value of a class is defined as the percentage of all examples of that class which are classified correctly by the trained model (Raschka et al. 2017). In the described case of only predicting the class 'no action', the recall value of both underrepresented classes would be 0%. The recall values of the underrepresented classes are a suitable metric for the evaluation of how well the opening and closing events are detected. A different hypothetical model that always predicts the shift towards an open window when the window is closed and towards a closed window when the window is open achieves a recall value of 100% for both underrepresented classes. As a single evaluation metric, the recall value of the underrepresented classes is thus also insufficient. Therefore, an evaluation of the models in two steps is carried out. In the first step, the recall value of the underrepresented classes is inspected, to see if the model recognizes the opening and closing events. Only those models that reach a determined threshold recall value of both underrepresented classes are evaluated further. Since there are currently no predictive models for the problem at hand, there are no comparative values for the achievable success and the threshold recall value must be chosen intuitively. For the purpose of this study, it is decided that a minimum recall value of 80% must be achieved for both underrepresented classes. Optimizing the models towards a high recall value of the underrepresented classes may come at the cost of misclassification of the overrepresented class of 'no action'. The performance of the models achieving the threshold is thus compared at the overall accuracy in order to determine the best model.

In summary, the two steps for the comparison of the performance of the different classification models are

1. the selection of models that achieve recall values of at least 80% for both underrepresented classes and
2. the comparison of the overall accuracy of only the selected models.

APPROACH FOR TRAINING

In an iterative process, machine learning models are trained for each algorithm, the predictions are evaluated, and optimization techniques are implemented.

The models built by the algorithms Decision Tree, Random Forest, and k Nearest Neighbors are strongly overfitted. The complexity of those models is therefore reduced by adjusting a corresponding built-in hyper parameter. For the adaptation of the hyper parameter, an additional validation set is created. Instead of using 70% of the data, only 60% are used for training and the remaining 10% serve as the validation set.

As an attempt to improve the predictive power of all models, a dimensionality reduction is implemented. This approach leads to a deterioration of the performance of all models and is discarded.

Another applied potential optimization is creating additional informative features from the chronologically previous values. At first, the variable of the duration of the current window state is added to the feature vector. If, for example, the occupant has a routine of briefly ventilating every morning and usually closes the window after about five minutes, this information is contained in the new feature.

The duration of the current window state is not the only information about the short-term past that may be relevant for the occupant behavior prediction. The development of the climatic conditions in the room can also have an influence on the sensation and accordingly on the occupant's behavior. Since the air temperature and the operative temperature correlate strongly, only the previous values of the operative temperature and the relative humidity inside the room are considered for the new features. Characteristic values are calculated for the period before each example. Regarding the length of this period, the four versions of ten, twenty, thirty, and forty minutes are examined.

First, only the differences between the first and last values of this period are added as a feature. The value difference represents the trend of the parameter during the given period.

As a final attempt of optimization, further variables are created from the periods before each example. Beyond the value difference between the first and last minute of the period, the mean value, the maximum value, and the minimum value are calculated and added as new features.

RESULTS

The best accuracy on unseen data under the condition of achieving a recall of 80% for the classes of window state transitions is 81.16% and is achieved by the Random Forest model after adding the feature of the duration of the current window state. The Gaussian Naïve Bayes model achieves an accuracy of 32.36% on the test set after the optimization steps of adding the duration of the current window state and the characteristic values of the period of ten minutes before each example. The two models built by Logistic Regression with the solvers ‘newton cg’ and ‘lbfgs’ both achieve an accuracy of 77.04%. This performance is reached after adding the features of the duration of the current window state and the characteristic values of the previous period of 40 minutes. The Logistic Regression model with the solver ‘saga’ achieves an accuracy of 71.48% on the test set after adding the duration of the current window state and the characteristic values of the period of ten minutes before each time step as features. The learning algorithms Decision Tree, Gradient Boosting, k Nearest Neighbors, Logistic Regression with the solvers ‘sag’ and ‘liblinear’, as well as Support Vector Machine with Stochastic Gradient Descent (with and without kernel approximation), are incapable of reaching the minimum requirement of a recall value of 80% for the underrepresented classes. Table 1 shows the comparison of the results of the successful algorithms.

*Table 1:
Comparison of achieved accuracy scores on
unseen data*

Rando m Forest	Gaussi n Naïve Bayes	Logistic Regressio n (‘newton cg’ and ‘lbfgs’)	Logistic Regressio n (‘saga’)
81.16%	32.36%	77.04%	71.48%

ALTERNATIVE PROBLEM DEFINITIONS

The previously described approaches attempt to optimize the creation of a predictive model for the window control behavior in a specific office room after each minute. To find out whether better results can be obtained with the existing data, alternative problem definitions are tested. The results cannot directly be compared to the original version but they indicate whether the alternative approaches are more promising. The feature vector used for these tests is the one having achieved the best result in the original problem definition.

One new problem definition is training machine learning models on the data of an alternative office room with more than one occupant. The goal is to determine whether several occupants together show an averaged behavior with clearer patterns that can more easily be detected by learning algorithms. The data used for this approach is collected in an office room on the eastern side of the ground floor of the same building. It is shared by two occupants and has two windows. No distinction is made whether one or two windows are open. The same evaluation metrics are used as for the original problem definition. Compared to the performance of the original version, two more models achieve the minimum requirement. Furthermore, the performance increases for three of the models that already achieve the minimum requirement in the original problem definition and decreases for two of them. The predictions are generally better for most models for the alternative office room with two occupants. The best achieved accuracy of 80.49%, however, is below the best performance for the original problem definition (81.16%).

The originally defined task of predicting the window control behavior to the minute is very complex. Even if the thermal conditions inside a room are known to be outside the comfort range, it does not necessarily mean that the occupants will directly act on it. Their reaction time can also depend on the type of activity they are involved in at that moment. One more attempt to simplify the problem definition is down sampling the time steps of one minute to time steps of ten minutes. The information on whether the window will be opened at one point during the subsequent period or not is defined as the new label. The closing events are no longer considered. The predictions of these models would be useful for the field of building automation but cannot be applied for modeling the occupant behavior in thermal building simulations. In this version as well, a recall value of 80% for the class of ‘window will be opened in the following ten minutes’ is set as a requirement. The best overall accuracy for this approach of 84.96% is achieved with the Logistic Regression model with the solver ‘sag’.

The exploration of the ground-truth input data shows that window state transitions only happen on weekdays between minute 370 and 1,126 of the day, which is thus the time where window control actions can generally happen. One way to change the problem definition is therefore to eliminate the examples from periods where the window state always stays the same before using the data set for training. Intuitively, what changes is that the model doesn’t need to focus on learning the times when events can potentially happen and can instead focus on detecting the patterns during the times of possible actions. The resulting model can only be used to predict the window control behavior from Monday to Friday between 6:10 a.m. and 6:46 p.m. The

number of opening and closing events (examples of the underrepresented classes) remains the same in the new data set and it is, again, required that at least 80% of them are classified correctly. Among all models that achieve this requirement, the best overall accuracy on unseen data of 54.71% is achieved by the model trained by the algorithm Logistic Regression with the solver 'sag'.

INTERPRETATION

The predictions of the model with the best achieved accuracy score for the original problem definition of 81.16% (an optimized Random Forest model) are inspected and interpreted.

The model classifies all window closing events of the test set and 34 out of the 42 window opening events correctly. The focus on the correct classification of the underrepresented classes leads to the prediction of both window state transitions more than 600 times as often as they occur.

The overall accuracy of over 80% may appear satisfying but it is mainly achieved because the model recognizes that the window state is never changed during certain periods. When only considering the predictions for the time during the nights and the weekends, the achieved accuracy is 94.96% and only 52.06% for the period of possible window control actions (workdays between 6:10 a.m. and 6:46 p.m.).

For each day of the 202 days of the test set, a plot is generated showing the window state, the ground-truth label, and the predicted label for each minute for further interpretation of the results.

The first pattern detected from the plots is the prediction of a window opening action every morning around minute 400 of the day (6:40 a.m.) for 15 to 120 continuous minutes. The exploration of the entire dataset shows that window opening events mostly happen in the morning around minute 400 of the day. By predicting window openings every morning, the model successfully detects all actual window openings that correspond to this morning routine.

The predictions for the examples when the window is open are examined. Whenever the time is within the period of potential activity, a window closing is predicted. Only when the window remains open during the night, it is predicted that the window state remains the same.

On 40 of the 202 days of the test set, the model predicts an opening for almost every minute between approximately 6 a.m. and 7 p.m. whenever the window is closed. On 25 of these days, window openings do happen at some point. The predictions for those days are therefore wrong for almost all minutes, but the occurring opening events are classified correctly. On the remaining 15 days of the 40 days, the window remains closed the entire day. These 15 days do, however, show a pattern. They are

all on a weekday that is either one day before or after a day where opening events occur. It can thus be concluded that the model does recognize a pattern in the feature values that indicates a higher probability of window opening events occurring on specific days.

SUMMARY AND CONCLUSION

Regarding the life cycle-based resource consumption as well as the environmental impacts, the building sector plays a major role in today's strive for a more sustainable future. A life cycle-based assessment and optimization of buildings is key in finding sustainable solutions. Within the life cycle of a building, the use stage is still responsible for a major share (de Larriva et al. 2014). During the planning phases of a building, the energy demand can be estimated using different methods, e.g. static calculations or dynamic thermal building simulations. There is, however, a discrepancy between the estimated energy demand and real energy consumption due to different aspects. One of the main aspects is the energy-relevant occupant behavior, especially regarding natural ventilation (Moeller et al. 2020). Therefore, a need for a deeper understanding and accurate prediction of the occupant behavior arises. This paper identifies the potentials and limitations of using machine learning classifiers to detect patterns and predict the occupants' window control behavior. To make use of the possibilities machine learning provides, actual data of parameters that potentially impact the occupants' behavior is needed. Within the framework of this study, an extensive energy and occupant behavior monitoring was and still is carried out over four years and data regarding the indoor climate, the outdoor climate, and the window handle state is collected.

In the first step, the data and the problem are analyzed and suitable machine learning algorithms are identified. As an attempt to improve the predictive power of all models, different optimization techniques such as dimensionality reduction, an adaptation of built-in hyper parameters, and the creation of additional features are implemented.

The accuracy and recall values are chosen as performance evaluation metrics. For the recall value, a minimum value of 80% is required for both underrepresented classes of the opening and closing events on unseen data of the test set.

Overall, only the models built by the Random Forest, Gaussian Naïve Bayes, and Logistic Regression algorithms are capable of meeting the minimum requirement. The achieved accuracy is 81.16% for the Random Forest model, 32.36% for the Gaussian Naïve Bayes model, 71.48% for the Logistic Regression model with the solver 'saga' and 77.04% for the two models built by the Logistic Regression algorithm with the solvers 'newton cg' and 'lbfgs'. The learning algorithms Decision Tree, Gradient

Boosting, k Nearest Neighbors, and Support Vector Machine with Stochastic Gradient Descent are unsuited for the task.

Some of the implemented optimization techniques contribute significantly to improved predictive performance. There is, however, no combination of adaptations that works best with all algorithms. Some of the optimization techniques improve the performance of certain models and deteriorate others.

At first sight, the achieved accuracy of over 80% appears to be a satisfactory result. Closer inspection reveals that almost half of all predictions during the potential occupancy period (workdays between 6:10 a.m. and 6:46 p.m.) are wrong. However, certain patterns are recognized successfully. For instance, the model detects the times when nothing ever happens, the morning ventilation routine, and the days when window openings are likely to occur. Attempting to improve the models with the same data but alternative problem definitions does not lead to significant improvements.

Overall, the approaches tested in this study cannot be used for practical applications in thermal building simulations and building automation. It can be assumed that the available data is insufficient for a solution to the described problem.

OUTLOOK AND POSSIBLE FURTHER APPROACHES

To further explore the field of predicting window opening behavior based on the described findings, several additional approaches can be carried out.

One approach could be the training of models with learning algorithms of the field of deep learning. This could make sense given the high dimensionality of the feature vector and the complexity of the problem. Statistical methods from the field of statistical modeling have been developed specifically for multivariate time series data. These methods do not belong to the field of machine learning, but they could potentially be appropriate solutions for the problem at hand.

Furthermore, the problem could be redefined accordingly to one specific application case. For thermal building simulations, the realistic representation of window opening durations is important. It is therefore not particularly important to detect the exact time of the window state transition. A new problem definition could be the prediction of the number of minutes with an open window within a defined time as a regression problem. For the field of building automation, the duration of window openings is less relevant. What is more important is to recognize in advance when the window will be opened in the future. This could also be defined as a regression problem, which predicts the number of minutes until the next window opening event.

Despite applying all described optimizations and simplifications, it may still not be possible to develop a successful model with the available data. As explained in the introduction, the parameters monitored in this study are not the only factors known to influence the window control behavior. For future projects, more information could be gathered as input variables. Sensors detecting the CO₂-concentration, the air velocity, and the presence of occupants inside the room could be installed. The degree of clothing, activity level, and mental state of the occupants also influence the behavior but are challenging to measure. Another aspect that might influence the decision to open the window is the weather forecast for the same and following day.

Based on the findings of this project, a self-sufficient mobile measurement box is currently being developed at the Institute of Energy Efficient and Sustainable Design and Building of TU Munich to address the need to measure more parameters (e.g. CO₂-concentration, air velocity, sound pressure level, indoor air quality) and to be able to measure the indoor climate closer to the occupants. The box will be used in two future research projects.

First of all the box will be used in the research project 'NuOpt Office' which is a project based on an already finished research project called 'Eco+Office ASBau' where a life cycle-based plus-energy and CO₂-neutral office building was developed (Harter et al. 2019). Since the use stage plays a major role, the energy consumption, the indoor climate, and the energy-relevant occupant behavior will be monitored extensively. Special focus will be placed on the occupant-oriented determination of relevant indoor climatic parameters. As a case study, an office building in Hof, Germany will be used.

In regard to the goal of achieving climate-neutral buildings, the building stock also has a major share. The second research project 'NuData Campus' therefore aims to optimize existing buildings and facilities. As a case study buildings of the University of Applied Sciences Munich will first be analyzed and classified in terms of energy consumption and the type of use. The Institute of Energy Efficient and Sustainable Design and Building of TU Munich is researching the partial aspects of socio-economic modeling of occupant influences and sustainable reference system concepts.

ACKNOWLEDGEMENT

The presented study is partly based on research conducted in the project 'Ferdinand Tausendpfund - - Lebenszyklusanalyse und Gebäudemonitoring', funded by the *Bavarian Building Industry Foundation (BBIV)*.

REFERENCES

- Abergel, T., et al. (2017). Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector: Global Status Report 2017. UN Environment and International Energy Agency: Paris, France.
- Beckhoff Information System. Retrieved March 2, 2020 from https://infosys.beckhoff.com/index_en.htm
- Burkov, Andriy. 2019. The Hundred Page Machine Learning Book. 2019.
- de Larriva, R. A., Rodríguez, G. C., López, J. M. C., Raugei, M., & i Palmer, P. F. (2014). A decisionmaking LCA for energy refurbishment of buildings: Conditions of comfort. *Energy and Buildings*, 70, 333-342.
- DIN, EN 15251:2012-12. (2012). Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics; German version EN 15251:2007
- DIN, V. 18599-10: 2018-19. (2018). Energy efficiency of buildings - Calculation of the net, final and primary energy demand for heating, cooling, ventilation, domestic hot water and lighting - Part 10: Boundary conditions of use, climatic data
- EnOcean GmbH. "868 Mhz EnOcean Für Europa." EnOcean, Retrieved March 2 from https://www.enocean.com/de/produkte/enOcean_module/
- Fabi, Valentina, et al. 2012. Occupants' window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models. *Building and Environment* 58 (2012). 2012.
- Harter, H.; Meier-Dotzler, C.; Vollmer, M.; Lang, P.; Pfoh, S.: AS-Bau Hof GmbH - Eco+Office -- Plusenergie und CO2-Neutralität. Innovation 2019
- Markovic, Romana, et al. 2017. Comparison of Different Classification Algorithms for the Detection of User's Interaction with Windows in Office Buildings. Aachen : s.n., 2017.
- Moeller, S., Weber, I., Schröder, F., Bauer, A., & Harter, H. (2020). Apartment related energy performance gap—how to address internal heat transfers in multi-apartment buildings. *Energy and Buildings*, 109887.
- Ng, Andrew. 2018. Machine Learning Yearning. 2018.
- Pedregosa, F., Varoquaux, Gaël, Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., ... others. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12(Oct), 2825–2830.
- Perner, Petra. 2013. Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition. New York : s.n., 2013.
- Raschka, Sebastian and Mirjalili, Vahid. 2017. Python Machine Learning. 2017.
- Sammut, Claude and Webb, Geoffrey I. 2010. Encyclopedia of Machine Learning. 2010.
- Vollmer, M.; Harter, H.; Schneider-Marin, P.; Lang, W.; Pfoh, S.: Ferdinand Tausendpfund -- Lebenszyklusanalyse und Gebäudemonitoring: Innovation 2019.

SIMULATION-BASED ANALYSES AND EVALUATION OF OPERATIONAL FAULTS IN BUILDING TECHNOLOGY

L. Lauss¹ and T. Auer¹

¹Chair of Building Technology and Climate Responsive Design,
Technical University Munich, Germany

E-Mail: lukas.lauss@tum.de

ABSTRACT

This paper investigates the performance gap in existing buildings. The performance gaps are usually less often found in constructional factors and more often found in building technology and its automation due to hydraulic and control engineering problems. The introduced methodology, coupling a Monte-Carlo approach with building performance simulations is applied to identify the main factors influencing energy-efficient building and system operation. Moreover, the effects of operating faults are quantified based on sensitivity and uncertainty analyses. The main finding is that operational faults in building technology systems have major implications on building operation and result in performance gaps.

INTRODUCTION

Background and Problem Definition

In order to achieve the German national climate protection targets, by 2050 the primary energy demand must be decreased by 80 % of the 2008 levels. In addition, building stock of all types have to become almost climate-neutral (BMW, 2016). However, the construction of climate-neutral buildings cannot compensate for the ecological footprint of existing building stock. The new build construction rate in Germany is around one percent (Kirchner et al., 2018), which means that 70 % of the 2050 building stock already exists. Therefore, energy saving potentials in these buildings must be identified as well as exploited and building technology plays an essential role in this task.

Particularly in non-residential buildings, the requirements for thermal comfort and user satisfaction as well as productivity factors are very demanding, which means exact conditioning of the interior climate is necessary. This in turn means it is necessary to install extensive technical building equipment. The various influences, such as weather conditions and user behaviour, make the use of additional Building Automation and Control Systems (BACS) as well as regulation functions indispensable to operating building technology efficiently.

Accordingly, not only energy-efficient, but also correct and fault-free operation of the system as well as further operational optimisation of the building

technology is necessary. However, this is often not the case and the consumption as well as proposed target figures from the planning process differ considerably from the values measured in the operating phase. This discrepancy is referred to as the performance gap (PG). The causes are generally less frequently problems arising from construction but rather operating faults in the building technology and especially its automation (Auer, Lauss et al., 2020; Dronkelaar et al., 2016). In this context, according to the International Energy Agency (IEA), a fault is generally described as “unpermitted deviation of at least one characteristic property or parameter of the system from acceptable/usual/standard condition” (Dexter et al., 2001). As a result, increased energy and resource consumption, dissatisfied and unproductive users due to thermal discomfort and limited quality of interior environment, system malfunctions and even supply interruptions as well as rising operating costs and increased CO₂ emissions can occur.

Motivation and Task

The original goal of erecting a building that functions perfectly for the users, including low energy requirements and the use of cost-effective building technology, is often not attained. Consequently, a considerable quality risk exists for investments in energy efficiency and user satisfaction in the life cycle of buildings due to the resulting performance gap. This large energy saving potential must be exploited to achieve our climate protection goals.

To this end, we introduce a methodology to analyse and evaluate operating faults in building technology systems and to optimise building performance. Furthermore, we identify the essential influencing parameters and adjusting screws for energy-efficient building and system operation. Based on this, the effects of operating faults in the technical building equipment will be examined in their entirety and energy saving potentials quantified. For these investigations, a model-based procedure is developed and applied to explore the effects of operation faults in the context of the performance gap. Stochastic building models are created with consideration of uncertain boundary conditions, and different operational faults are implemented. The detailed, dynamic building performance simulations

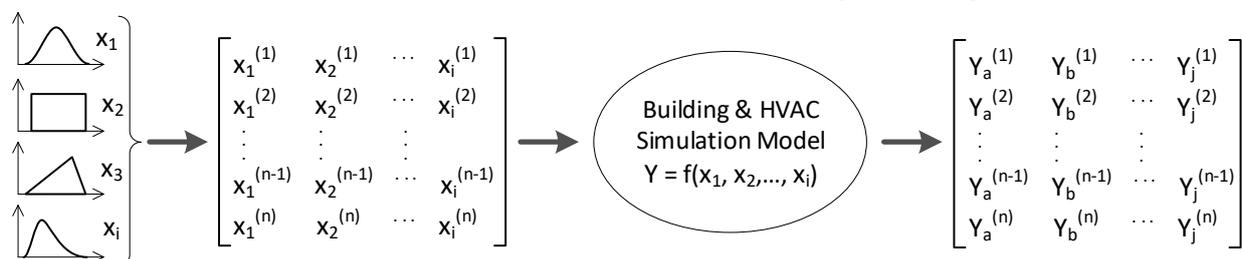
(BPS) in combination with uncertainty and sensitivity analyses are intended to show the overall effect of operating faults and parameter uncertainties.

METHODOLOGY

Heating, ventilation and air conditioning (HVAC) systems are not subject to a fixed system scheme, but differ in the type and number of components installed and their level of automation. For example, in the case of air handling units (AHU), the DIN EN 16798 differentiates between nine system configurations that can assume various thermodynamic functions. Besides the composition of the components, the type of dimensioning and control strategy of the components offer further possibilities for variation.

Because many correct operating states can occur in building technology, a large number of parameters move within a value range and should not be regarded as static or fixed numbers. To map these dynamics, a process should be established that allows the statistical variation of different input parameters and analysis their impact on building performance. The same applies to the stochastic fluctuations of operational faults, such as variance, frequency or probability of occurrence. However, the result is not only influenced by the operating fault itself, but also by the states of the other parameters. Monte-Carlo simulations (MCSs) combined with sensitivity and uncertainty analyses are used at this point to represent the wide range of correct operating conditions and faults as well as to determine the results (Y's) by variation in the input parameters (x's). Figure 1 represents the workflow for MCSs employed in this paper.

Monte-Carlo simulations are a stochastic method in which random experiments are carried out very frequently, to solve problems numerically that cannot be solved analytically with the help of probability theory. The frequent repetitions of the



sample-based simulations are the starting point for generating a distribution of the output. It follows that the examined target variables cannot be assigned to a single correct result, but change dynamically depending on the input parameters and have a probability distribution. Therefore, an MCS is used to prepare the uncertainty analysis of the output Y and the expected value μ (1), the standard deviation σ (2) and the variance V (3) are determined by the following equations:

$$\mu(Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{1}$$

$$\sigma(Y) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [x_i - \mu(Y)]^2} \tag{2}$$

$$V(Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [x_i - \mu(Y)]^2 \tag{3}$$

Uncertainty and Sensitivity Analyses in Building Performance Simulations

In BPS the influence of individual input parameters (x's) on the target variables (Y's) is often unknown. In this regard, general methods that investigate relationships between information from input variables and output variables of a model are defined as sensitivity analyses (SAs). In order to identify the essential set screws and potentials, the SA provides a ranking of the most influential parameters based on the inputs. Within the scope of this paper, SAs are carried out in two steps. The first step is to determine the relative sensitivity of all input parameters. For this purpose all parameters are equally weighted and the same standard deviation of +/- x % is defined for all expected values of the inputs. This makes it possible to get a feel for the model and to determine the relative influence of each parameter. The second step is the specific sensitivity analysis, where the standard deviations of all input parameters are adapted to the real conditions of the examined process or experiment. The resulting scatter of the output due to the variation of the input parameters is considered as the uncertainty of the model. The uncertainty analyses (UAs) quantifies the total uncertainty of the result of a model and is a measure of the robustness of a system. The principle and procedure of a sample-based UA is divided into several steps. The input parameters (x's) are assigned a probability distribution (e.g. normal N, uniform U, triangular T or logarithmic L). Values are

then selected from this distribution using so-called sampling methods and are integrated into the model. By repeating the simulations frequently, a distribution of the target values (output) Y's is created. This distribution Y is interpreted as the model uncertainty. The uncertainties are quantified using the known statistical estimators for the expected value and the standard deviation or variance. However, visualisations of the model output using density and distribution functions or box-plots are more suitable.

Simulation Setup

In this paper, a simulation setup is designed and applied, which essentially represents the interaction of three different softwares. Firstly, the software "Plancal Nova", a CAD/CAE-software for building technology, is used to set up and create an exemplary object of investigation with the corresponding systems engineering. The floor plans, 3-D views and technical building system diagrams are designed. In addition, the pre-defined geometric and building physics inputs as well as specifications are used to calculate the heating load and the heat output systems. Afterwards, the software "R-Studio" with the R programming language is used for pre-processing with the calculation of the probability distributions for the input parameters, the creation of a sample matrix and the transfer of the values into the simulations. The building and plant model for the dynamic thermal simulations is created in the "IDA Indoor Climate and Energy" (ICE) software. Firstly, the floor plans and calculated objects in Plancal nova are imported into IDA-ICE and then the thermal behaviour of the buildings is realistically mapped. All systems for building operation – heating, ventilation, cooling and lighting with all relevant control algorithms – are mapped in the model. IDA-ICE works with text files to transmit inputs in the Graphical User Interface to the DAE-Solver. It is possible to change the input of the variables in R-Studio based on the pre-processing. The simulations and processing of the simulation matrix are performed by coupling the software R-Studio with the building and HVAC simulation program IDA-ICE multiple times. The results of each simulation are written into separate output files and are then prepared by post-processing in R-Studio. The final sensitivity and uncertainty analysis of the target variables takes place following the previous steps.

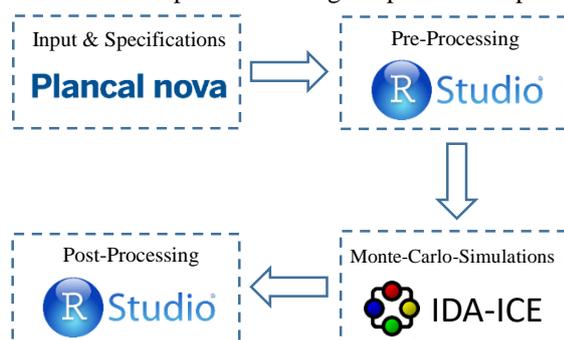


Figure 2: Workflow and simulation setup

This simulation setup, shown in figure 2, allows the coupling of a Monte-Carlo approach with building performance simulations and a workflow for the automated analyses as well as evaluation of the performance of HVAC systems.

CASE STUDY

The application of the methodology is now demonstrated with a case study. The aim is to identify the main factors influencing the energy-efficient operation of air conditioning systems and to quantify the effects of operating faults in AHU's.

With regard to the operating faults to be investigated in this paper, our research project (Auer, Lauss et al., 2020) identified some irregularities and problems in the operation of AHU's in non-residential buildings: under-/overrun of the defined operating time (Fault 1/Fault 2), deviation (too high/too low) of supply air temperature from setpoint (Fault 3/Fault 4) and stucked bypass damper (Fault 5).

These investigations form the basis of the considered as well as the simulated operational faults and the derived fault characteristics are implemented in the building and HVAC simulation model. The simulations thus generate synthetic operating data that reflect correct operation of the simulated system followed by the targeted implementation of pre-defined operating faults and subsequent MCSs as well as evaluation with UAs/SAs.

Building and HVAC Simulation Model

The building model is based on a typical three storey office building, which represents the average of this category for non-residential buildings in Germany (Deilmann et al., 2013). The model structure is based on the boundary conditions of the usage profile for group offices according to DIN V 18599-10. The focus of the investigations is on systems engineering and its automation, which is why we chose office buildings with an appropriate level of technical equipment. The energy standard is thus based on a corresponding building age class, and the building model is based on the building physics parameters of the EnEV 2009 for the typical construction structures. A gas condensing boiler provides the heating energy for room heating and for conditioning the supply air in the heating coils of the AHU. In order to investigate the thermodynamic processes of the three air treatment functions, i.e. heating, cooling and dehumidifying, ventilation systems are modelled as partial air conditioning systems (see Figure 3). The AHU is based on VDI 6009-1 and is designed with constant air volume (CAV) and constant supply air temperature control. According to (Werner et al., 2008) partial air conditioning systems are also used three times as often as full air conditioning systems in office and administration buildings. A compression refrigeration machine provides the cooling demand for the cooling coil in the AHU.

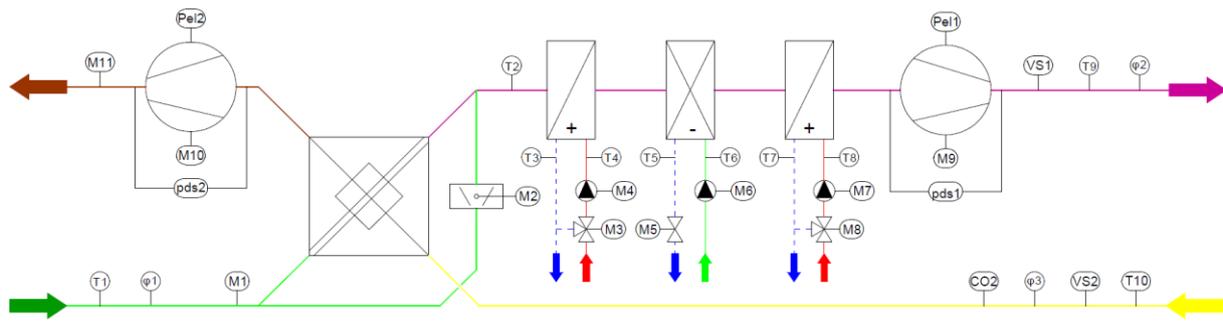


Figure 3: Schematic drawing of investigated AHU

Pre-Processing

The selection of the input parameters for the MCSs as well as SAs and UAs is based on the test object and its HVAC simulation model. Based on the AHU system configuration, all constructive (e.g. structural and design) and scenario (e.g. control and operational) uncertainties are selected as input variables. These set screws for the correct operating conditions are listed in table 1. The probability density functions are based on normative foundations as well as planning and design criteria.

Table 1: Input parameters and probability density functions correct operating conditions

NO.	INPUT-PARAMETER	DISTRIBUTION (μ ; σ) / (min ; max)
x1	Heat Recovery Efficiency AHU [-]	$x1 \sim N(0.55 ; 0.097)$ → range: 0.34 – 0.78
x2	Setpoint Icing Protection Controller [°C]	$x2 \sim N(3.00 ; 0.776)$ → range: 1.10 – 4.90
x3	Pressure Loss Supply Air [Pa]	$x3 \sim N(1325 ; 184.394)$ → range: 879 – 1771
x4	System Efficiency Fans [-]	$x4 \sim N(0.55 ; 0.058)$ → range: 0.43 – 0.69
x5	Switch-On Time AHU [h]	$x5 \sim U(5.00 ; 7.00)$
x6	Switch-Off Time AHU [h]	$x6 \sim U(18.00 ; 20.00)$
x7	Setpoint Supply Air Temperature [°C]	$x7 \sim L(18.00 ; 1.553)$ → range: 18.02 – 22.13
x8	Pressure Loss Exhaust Air [Pa]	$x8 \sim N(795 ; 118.401)$ → range: 509 – 1081
x9	Volume flow AHU [l/s*m ²]	$x9 \sim N(1.097 ; 0.114)$ → range: 0.82 – 1.37
x10	Flow Temperature Heating Coils [°C]	$x10 \sim N(70.00 ; 3.882)$ → range: 60.6 – 79.4
x11	Flow Temperature Cooling Coil [°C]	$x11 \sim L(6.00 ; 3.106)$ → range: 5.08 – 14.02
x12	Heat Generator Efficiency [-]	$x12 \sim L(0.89 ; 0.043)$ → range: 0.81 – 0.98
x13	Energy Efficiency Ratio Cooling Machine [-]	$x13 \sim N(4 ; 0.388)$ → range: 3.06 – 4.94

The first step is to determine the relative influence and sensitivity of each input parameter. The same percentage uncertainty is hence defined for each parameter and all expected values are assigned a standard deviation of +/- 10%. The selected standard deviation of +/- 10 % allows remaining within a realistic value range with all inputs. In the second step, the specific sensitivity analysis is carried out,

and the assignment of the probability distributions of the input parameters are adapted to the real conditions as well as possible planning bases and operating states of air conditioning systems (see Table 1). The operational faults of the input parameters and probability density functions, shown in table 2, are then implemented. Thus, to ensure comparability each input parameter is given the same probability of occurrence; the faults therefore occur permanently and over the same time period.

Table 2: Input parameters and probability density functions operational faults

NO.	INPUT-PARAMETER	DISTRIBUTION (MIN ; MAX)
x5	Fault 1: overrun defined operating time AHU [h]	on ~ U(0.00 ; 5.00)
x6		off ~ U(20.00 ; 24.00)
x5	Fault 2: underrun defined operating time AHU [h]	on ~ U(7.00 ; 12.50)
x6		off ~ U(12.50 ; 18.00)
x7	Fault 3: too high supply air temperature [°C]	$x7 \sim U(22.00 ; 26.00)$
x7	Fault 4: too low supply air temperature [°C]	$x7 \sim U(14.00 ; 18.00)$
x14	Fault 5: (sticked) bypass damper position [-]	$x14 \sim U(0.00 ; 1.00)$

Subsequently, values are selected from these distributions with the help of so-called "sampling" and integrated into the simulation models. A sample matrix is created by selecting (sampling) a point n times from the distributions of the various parameters. We use the "sobol" sequence from the package "randtoolbox" of R-Studio to generate the samples. Sobol sequences produce samples that are distributed as evenly as possible in the multidimensional parameter space. The random numbers are chosen taking into account the numbers already "drawn" to prevent accumulations and gaps in the parameter space. Thus the MCSs converge faster than when using other methods for drawing the sample (Burhenne et al., 2011). In building simulations, 100 runs or samples is often used to map the distributions with sufficient accuracy; a higher number of samples does not lead to greater accuracy (MacDonald, 2009). In this paper, for every simulation, 120 samples per parameter are created, resulting in a sample matrix with 120 rows and 13 columns (one column per parameter x1-x13) for the

correct operating conditions and 14 columns for operational fault 5 (x1-x13 + x14). In total 840 simulations are carried out for all research purposes.

Monte-Carlo Simulations

A software environment from the building simulation, IDA Indoor Climate and Energy (ICE), is used to create the thermal building and HVAC simulation model. The aim of the simulation is to depict the building as complete system and to map the dynamic reactions between building and systems engineering by means of detailed annual load profiles for rooms, HVAC systems as well as heat and cold generators using the multizone simulation application.

Post-Processing

In post-processing the uncertainty analysis of the target variables (TVs) and the sensitivity analysis for the identification of the essential influencing variables for an energy-efficient HVAC operation takes place. R and several R packages are also used again: R thus acts as system master for the whole workflow including pre-processing, simulations as well as post-processing and is controlled by scripting in this development environment.

Model uncertainties are analysed and evaluated on the basis of the TVs, which are divided into four impact categories to offer a closer look at different effects of the performance gap: first the Energy PG (effects on energy demand), second the Comfort PG (effects on thermal comfort, user satisfaction and productivity factors), third the Ecological PG (effects on greenhouse gas emissions) and fourth the Economical PG (effects on life cycle costs):

- Energy PG: total primary energy demand [kWh/m²a] (TV1), primary energy demand of AHU [kWh/m²a] (TV2)
- Comfort PG: lost work hours (if operative temperature > 25 °C or < 20 °C = performance loss of 2 % per degree) (Wyon, 2000) [h/a] (TV3), over- and undertemperature degree hours (otdh=TV4 / utdh=TV5) [kh/a] according to DIN EN 15251 of critical zones (odth=west, utdh=norht-east) determined by the following equations:

$$otdh = \sum |T_{Op} - T_{Level,ot}| * t \quad (4)$$

$$utdh = \sum |T_{Level,ut} - T_{Op}| * t \quad (5)$$

- Ecological PG: total CO₂ emissions (standard market values used) [kg CO₂/m²a] (TV6)
- Economical PG: total energy operating costs (market-based prices used) [€/m²a] (TV7)

The evaluation of the uncertainty analysis with graphical representation is based on scatter-plots,

histogramms, box-plots and Q-Q-Plots. For this purpose, histograms are used to illustrate the distributions, and the normal distribution is demonstrated by means of the two control graphics box-plots or Q-Q plots. For all target variables, the calculation of mean value μ, standard deviation σ as well as variance V is conducted and this results in the total uncertainty around the expected value TUNC_μ determined by the following equation:

$$TUNC_{\mu} = \frac{\sigma}{\mu} * 100 \% \quad (6)$$

Based on the case study, three methods are used to determine the sensitive input parameters and will be compared due to the different application for linear and non-linear correlations. First, the correlation coefficients according to Pearson and Spearman are calculated, followed by the regression analysis using SRC, SRCC, PCC and PCC and the the final graphical evaluation of scatter plots are coupled with “Conditional Variances - Second Path” (Saltelli et al., 2008).

RESULTS AND DISCUSSIONS

The results presented below are divided into three subsections: relative sensitivity analysis, specific uncertainty analysis and specific sensitivity analysis.

Relative Sensitivity Analysis

The results of the preliminary study for the specific sensitivity analysis are described below. This first analysis offers an initial impression of the model and determines the relative influence of the parameters examined. For this purpose, the same standard deviation and thus an uncertainty of +/- 10 % is assigned for all expected values of the individual input parameters, which means that the information on the relative SA is only conditionally reliable and only correct operating conditions are considered. The results in table 3 show that, almost independent of the method used for the sensitivity analysis, the parameters x9 “Volume Flow AHU”, x1 ”Heat Recovery Efficiency” and x7 “Supply Air Temperature” as well as x4 “System Efficiency Fans” have the greatest influence on the model in terms of TV 2 “Primary energy demand AHU”.

Table 3: Ranking of relative SA for Energy PG (TV2) with correct operating conditions

TV2	SPEAR. / SRCC	PRCC	V (*10 ³) [kWh/m ² a]
# 1	x9 (0.56)	x9 (0.89)	x9 (16.67)
# 2	x1 (-0.38)	x1 (-0.78)	x7 (8.37)
# 3	x7 (0.36)	x7 (0.76)	x1 (7.25)
# 4	x4 (-0.30)	x4 (-0.74)	x4 (7.22)
# 5	x5 (-0.27)	x3 (0.63)	x3 (6.37)
# 6	x3 (0.26)	x6 (0.58)	x5 (5.94)

The analysis of relative SA did not reveal any substantial differences between the two evaluation pairs Spearman/SRCC and Pearson/SRC. In addition, examining PRC instead of PRCC also does not produce a shift in the rankings, and thus the

ranking is representative for all evaluation methods. The evaluations of the Comfort PG (TV3-TV5) indicated that the AHU operating time (x5 on / x6 off), supply air temperature (x7) and volume flow AHU (x9) as well as flow temperature heating coils (x10) are the most sensitive input parameters. Ecological PG (TV6) and Economical PG (TV7) are most influenced by volume flow AHU (x9), flow temperature cooling coil (x11), switch-on time AHU (x5) and the fan system efficiency (x4) as well as the heat generator efficiency (x12).

Specific Uncertainty Analysis

In this investigation, all input parameters are adapted to the respective properties and a defined standard deviation is assigned (see Table 1). Within the framework of the Monte-Carlo analysis, 720 simulations are carried out to map correct and faulty operating conditions with the developed building and HVAC model. Figure 4 presents the results of the UA for correct operating conditions using the TV 2 “Primary energy demand AHU”.

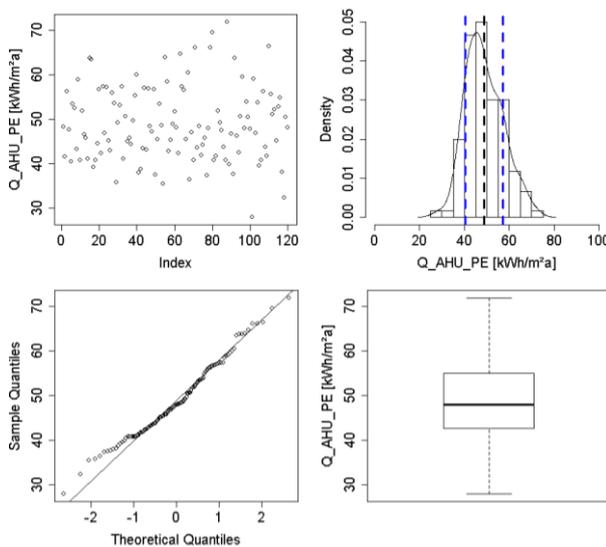


Figure 4: Evaluation of UA for Energy PG (TV2) with scatter-plot, histogram, Q-Q plot and box-plot

The scatter-plot represents the graphical visualisation of observed value pairs of two statistical characteristics; for each of the 120 simulations, a result value is entered for the TV2. The histogram shows the graphical representation of TV2 with a frequency distribution based on the variation of different input variables and the calculated expected value (black dotted line) as well as the standard deviation (blue dotted lines). The two control graphs, Q-Q Plot and box-plot, are used to determine if an existing normal distribution exists. Since no errors or outliers can be detected in the diagrams, a normal distribution is assumed below. An expected value of 48.9 kWh/m²a is calculated for TV2 and the standard deviation of 8.4 kWh/m²a is used as a measure of uncertainty. Thus, the variation of the uncertain boundary conditions of constructive (e.g. structural and design) and scenario (e.g. control

and operational) uncertainties, with regard to correct operating conditions, results in a total uncertainty of 17.1 % around the expected value. Table 4 shows the target variables for the investigation of the Energy PG (TV1&TV2), Comfort PG (TV3-TV5), Ecological PG (TV6) and Economical PG (TV7) in the fault-free cases using the evaluation criteria of expected value μ , standard deviation σ , variance V and total uncertainty of around the expected value TUNC_ μ .

Table 4: UA with correct operating conditions

TV NO.	μ	σ	V	TUNC_ μ
TV1	191.9	9.3	85.9	4.8
TV2	48.9	8.4	70.2	17.1
TV3	391.9	59.3	3514.7	15.1
TV4	536.6	51.9	2688.7	9.7
TV5	398.8	90.7	8222.3	22.7
TV6	77.8	3.2	10.1	4.0
TV7	9.4	0.4	0.2	4.3

A total of 580 simulations are performed as part of the MCS to analyse and evaluate the operating faults. Figure 5 shows the evaluation of the TV2, and in combination with all TV’s in table 5 & 6 the faults are compared with the correct operating conditions based on the defined evaluation criteria.

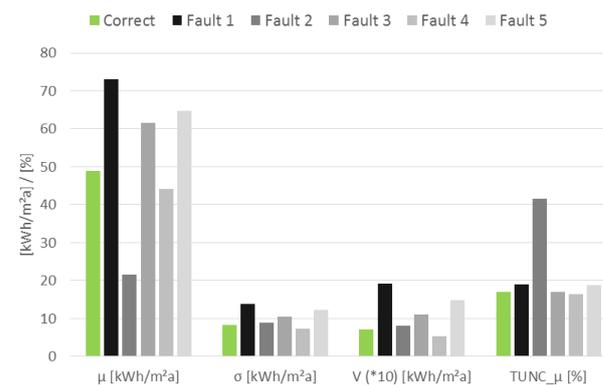


Figure 5: UA for Energy PG (TV2) correct vs. faults

Fault 1 “overrun defined operating time AHU” causes the greatest impact related to Energy PG as well as Ecological PG and Economical PG. For TV2 the additional energy demand in terms of the expected value is about 50 % above that for correct operating conditions. Fault 2 “underrun defined operating time AHU” would reduce the primary energy demand in AHU plant operation (TV2) by more than half compared with the fault-free reference, or approx. 15 % on the total primary energy level (TV1). This result however is counterbalanced by the analysis of all influencing factors on the PG. When looking at the Comfort PG, the effects of fault 2 are significant losses in the form of increased lost work hours (TV3) as well as increased over- (TV4) and undertemperature degree hours (TV5). In overall terms, the energy savings due to fault 2 would not compensate for the greatly reduced thermal discomfort as well as limited quality of interior environment, and would lead to additional

costs in the overall calculation. Fault 3 “too high supply air temperature” and fault 5 “sticked bypass damper” have similar effects and cause an Energy PG of about 30 % above compared to the correct operating conditions and also lead to an increase in Ecological PG and Economical PG. Regarding fault 4 “too low supply air temperature”, an energy saving of approx. 10 % compared to the reference can generally be determined for the system boundary AHU (TV2); however, the interactions between the building technology systems must also be taken into account here. Consequently, fault 4 leads to an increased total primary energy demand (TV1); the excessively low supply air temperatures must be compensated for by the increased heat output of the static heating surfaces. This scenario also increases the Ecological PG and the Economical PG.

Table 5: Expected values μ with operating faults

μ	C	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5
TV1	191.9	225.3	161.9	196.1	194.4	207.9
TV2	48.9	73.0	21.6	61.7	44.2	64.8
TV3	391	218.6	437.6	417.2	365.1	392.4
TV4	536	711.4	555.8	749.1	380.7	532.2
TV5	399	83.7	493.5	351.1	441.5	399.7
TV6	77.8	88.7	66.9	78.1	79.1	81.6
TV7	9.4	10.8	8.0	9.5	9.5	10.0

Table 6 shows the evaluations of the standard deviations for all target variables in the particular fault case in comparison with the correct operating conditions. The resulting total model uncertainty around the expected value is calculated by dividing the two variables σ/μ and is described by equation 6.

Table 6: Standard deviations σ with operating faults

σ	C	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5
TV1	9.3	15.4	10.0	10.6	9.1	13.4
TV2	8.4	13.9	9.0	10.5	7.2	12.2
TV3	59.3	28.4	63.7	52.3	66.7	59.6
TV4	51.9	71.9	70	31.7	70	53.9
TV5	90.7	38.1	94.3	85.5	97.1	90.7
TV6	3.2	5.2	3.6	3.3	3.2	3.8
TV7	0.4	0.7	0.5	0.4	0.4	0.5

Specific Sensitivity Analysis

Once the model uncertainties are established, a sensitivity analysis is carried out to determine the relevant parameters. Due to the unlimited application possibilities, the focus of the evaluations is on scatter plots; it does not matter whether a linear/non-linear or monotonous/non-monotonous relationship exists in the data. In addition, SAs using Spearman/SRCC and linear regression using PRCC are also performed. Figure 6 shows two SA results using the scatter-plot method. The uncertainty of input parameter x1 “Heat Recovery Efficiency” on the x-axis and TV2 on the y-axis are plotted on the left side and x12 “Heat Generator Efficiency” and TV2 are compared on the right side. A uniformly distributed scatter-plot means no correlation and a non-uniformly distributed plot is considered a correlation; so the two variables, TV2 and input x1,

show a clear correlation. The other parameters TV2 and x12 do not exert a strong influence. This finding can be confirmed using the other SA evaluation methods (see Table 7).

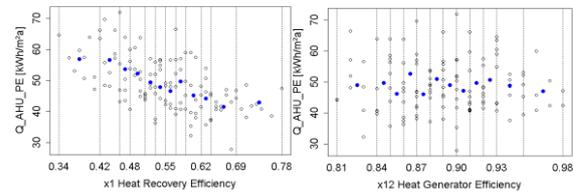


Figure 6: SA with variance analysis "Conditional Variance" algorithm for Energy PG (TV2)

The algorithm “Conditional Variances - Second Path” is used to create a ranking of the input parameters by dividing the results of the scatter-plots into ten equally sized areas and calculating the mean values of the output for each area (blue points). By scattering the ten mean values, a variance of the target variable in connection with the respective input parameter can be calculated. Table 7 lists the ranking of the most sensitive input parameters for TV 2 “Primary energy demand AHU” in terms of correct operation conditions.

Table 7: Ranking of specific SA for Energy PG (TV2) with correct operating conditions

TV2	SPEAR. / SRCC	PRCC	V (*10 ³) [kWh/m²a]
# 1	x1 (-0.58)	x1 (-0.91)	x1 (22.04)
# 2	x9 (0.50)	x9 (0.89)	x9 (19.14)
# 3	x5 (-0.29)	x4 (-0.74)	x5 (10.32)
# 4	x3 (0.29)	x3 (0.72)	x3 (8.50)
# 5	x4 (-0.25)	x6 (0.68)	x4 (7.12)
# 6	x6 (0.24)	x8 (0.57)	x7 (5.17)

Based on the specific SA for correct operating conditions and the results in table 7, the parameters x1 “Heat Recovery Efficiency”, x9 “Volume Flow AHU”, x5 “Switch-On Time AHU” and x3 “Supply Air Pressure Loss” have the greatest influence on the model output TV2. The varying results compared to relative SA can be explained as follows: x7 “Supply Air Temperature” now plays a subordinate role, since the value range has been adapted to real conditions and accordingly extends over a smaller range. In contrast, x1 is now significantly more influential and the most sensitive parameter, due to its extended value range. The ranking of the most sensitive inputs for the second target variable of the Energy PG (TV1) resulted in the same parameters as shown for TV2 in table 7, with only a slight shift in the order. In the analysis of the target values for the Comfort PG (TV3-TV5), the following input parameters are calculated with the greatest variance: AHU operating time (x5 on / x6 off), volume flow AHU (x9) and the flow temperatures of heating (x11) / cooling (x10) coils. For the Ecological PG (TV6) and Economical PG (TV7) the same sensitive input parameters are obtained as for the Energy PG with almost the same sequence as shown in table 7. Our method for evaluating the sensitivity indices with the algorithm "Conditional Variances - Second

Path" is also applied for the SAs of the operating faults. Table 8 shows the ranking of the most sensitive input parameters for the respective fault case.

Table 8: Ranking of specific SA with operating faults for Energy PG (TV2) by variance analysis ($V \cdot 10^3$)

	F1	F2	F3	F4	F5
# 1	x1 (57.9)	x6 (42.5)	x1 (31.9)	x9 (13.6)	x14 (68.3)
# 2	x9 (43.6)	x5 (25.9)	x9 (28.6)	x1 (13.0)	x11 (35.8)
# 3	x5 (38.8)	x7 (18.7)	x5 (18.7)	x5 (8.0)	x9 (33.5)
# 4	x3 (21.3)	x8 (15.3)	x7 (16.1)	x3 (7.0)	x8 (33.1)
# 5	x6 (19.5)	x10 (10.3)	x3 (11.1)	x4 (6.8)	x3 (25.9)
# 6	x4 (16.6)	x13 (6.9)	x11 (8.9)	x6 (4.7)	x5 (16.9)

In the sensitivity analysis with operating faults, regardless of the fault case, the input parameters x1, x9 or x14 and the operating time (x5, x6) with the switch-on time in the foreground have the highest priority for the scatter of TV2. The results also show that the fan system efficiency (x4) and the pressure drop on the supply (x3) and exhaust air side (x8) also have a significant influence on the variance of TV2.

CONCLUSION AND OUTLOOK

Our methodology, coupling a Monte-Carlo approach with building performance simulations, enabled identifying the essential input parameters for the energy-efficient and comfort related building and HVAC operation and quantifying the effects of operating faults. Based on sensitivity and uncertainty analyses, the major impact of operating faults on building and system operation reveals that the technical gap is one of the main drivers for performance gaps. Our study enhances academic and practical understanding of the factors influencing operational optimisation of building technology systems and improving energy efficiency as well as the user comfort in existing buildings. Moreover, future processes for energy and efficiency related quality assurance in building operation should take into account the discussed results and findings gained within the framework of this research. In this way a contribution to the development of an energy-optimised building stock can be made and goes beyond the scope of previous research work dealing within this context.

Future work should involve exploring additional operational faults in building technology systems and identifying fault characteristics and profiles which enable more detailed and realistic fault scenarios e.g. consider the frequency of occurrence. Based on the promising findings presented in this paper, work on the remaining issues will be continued and presented in future publications.

ACKNOWLEDGEMENT

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial or not-for-profit sectors.

REFERENCES

- Auer, T., Lauss, L., et al. 2020. Big Data in der Gebäudeautomation - Big Data Analysen von Automationsdaten zur energetischen Betriebsoptimierung des Gebäudebestandes, Forschungsbericht, Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, TU München, DOI: 10.14459/2020md1546757.
- Burhenne S., Jacob D., et al. 2011. Sampling based on sobol sequences for monte carlo techniques applied to building simulations. Conference of International Building Performance Simulation Association In Building Simulation, Sydney.
- BMWi. 2016. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Energieeffizienzstrategie Gebäude, Grünbuch Energieeffizienz, Diskussionspapier, Berlin.
- Deilmann, C., Behnisch, M., et al. 2013. Systematische Datenanalyse im Bereich der Nichtwohngebäude – Erfassung und Quantifizierung von Energieeinspar- und CO₂-Minderungspotenzialen, BMVBS-Online-Publikation 27/2013, Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung, Berlin.
- Dexter, A., Pakanen, J. 2001. Building Energy Management System - Demonstration Automated Fault Detection and Diagnosis Methods in Real Buildings., Annex 34, International Energy Agency (IEA).
- Dronkelaar, van C., Dowson, M., Burman, E., et al. 2016. A review of the energy performance gap and its underlying causes in non-domestic buildings, *Frontiers in Mechanical Engineering, Journal*, Volume 1.
- Kirchner, A., Ess, F. 2018. Wirkung der Maßnahmen der Bundesregierung innerhalb der Zielarchitektur zum Umbau der Energieversorgung, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Forschungsbericht, Karlsruhe.
- MacDonald, I. A. 2009. Comparison of sampling techniques on the performance of monte carlo based sensitivity analysis, *Building Simulation, 11th Internat. IBPSA Conference*, Glasgow.
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., et al. 2008. *Global Sensitivity Analysis, The Primer*, Wiley-Interscience.
- Werner, P., Chmella-Emrich, E., Vilz, A. 2008. Folgen des Klimawandels: Gebäude und Baupraxis in Deutschland, *BBR-Online-Publikation*, Nr. 10/2008.
- Wyon, D. 2007. Individual control at each workplace - the means and the potential benefits, In: Clements-Croome, D. (editor), *Creating the productive workplace*, E&FN Spon, London and New York

MOBILE APPLICATION FOR ACTIVE CONSUMER PARTICIPATION IN BUILDING ENERGY SYSTEMS

T. Schranz¹, K. Corcoran², T. Schwengler¹, L. Eckersdorfer² and G. Schweiger¹

¹Institute of Software Technology., TU Graz, Graz, Austria

²Institute of Psychology, University of Graz, Graz, Austria

ABSTRACT

Scientific literature predicts a significant rise in energy demand over the next decades. Optimizing energy systems is a key step toward reducing energy-related greenhouse gas emissions. Recent studies show that active consumer participation and the integration of modern information and communications technologies are key techniques for successfully streamlining energy systems. The main objective in the GameOpSys research project is to develop a means to accurately predict the energy consumption of buildings based on patterns in smart meter data and user-generated input. To do so we propose a user-centered software system for communication between building occupants and energy system operators.

INTRODUCTION

Scientific literature predicts a significant rise in energy demand in the next decades (Abas et al., 2015; Allouhi et al., 2015, Clarke et al., 2009). Over the last decades, socioeconomic development has driven a demand for larger homes, a wide variety of energy-consuming entertainment services and a significant growth in commercial building stock. This has led the building sector to become the largest contributor to global energy demand and greenhouse gas emissions (Allouhi et al., 2015) accounting for 32% of the world's total energy consumption and for 19% of all energy-related greenhouse gas emissions (Lucon et al., 2014).

In the European Union (EU) buildings account for 40% of the total energy demand (European Commission, 2019). Energy consumption in residential buildings, with a share of 27% of the total demand in the EU, is the second largest contributor after transportation (Uihlein and Eder, 2009; Allouhi et al., 2015). Besides socioeconomic changes, inefficient energy systems, especially inefficient energy services are major contributors to the surge in energy consumption (van Vuuren et al., 2012). The EMF-22 study (Clarke et al., 2009) on long-time climate stabilization policies highlights energy efficiency improvement as a crucial means towards reducing greenhouse gas emissions.

It becomes apparent that research and development should improve efficiency in future energy systems and help include clean sources of energy, such as renewables. Building simulation provides the necessary framework to optimize energy efficiency within the constraints imposed by the volatile nature of renewable energy sources. It is a key research interest to accurately simulate and predict occupancy and energy demand patterns in buildings. Recent studies show that active consumer participation and the integration of modern information and communications technologies (ICTs) support the development of data-driven occupancy and demand models (Vazquez-Canteli et al., 2019; Verbong et al., 2013).

We propose a user-centered software system that facilitates bidirectional communication between building occupants and energy system operators. The system comprises data persistence, standardized interfaces for data retrieval (e.g. for data analysis services) and an intuitive user interface (UI), in the form of an Android application. The application connects occupants with the energy system and allows them to access usage statistics and visualizations.

User-Centered Data Analysis

The main objective in the GameOpSys (Gamification for optimizing the energy consumption of buildings and higher-level systems) research project is to develop a means to accurately predict the energy consumption of buildings based on patterns in smart meter data and user-generated input. Accurate forecasts provide the basis for numerous energy services such as flexibility identification, demand response, model predictive control or peer-to-peer trading. Broad availability of these services, social changes, such as increased awareness of climate change, and shifts in energy production stimulate active consumer involvement. It is an open research question as to find the level of user engagement, i.e. frequency, intensity and means of interaction to harness these societal developments in data-driven simulation approaches.

SIMULATION AND EXPERIMENT

Residential load profiles vary substantially depending on consumer usage of appliances. Gobmaier showed that data-driven, bottom-up load modeling, based on the use of appliances, can explain up to 96.9% of variance in load profiles (Grobmainer, 2014) and Gram-Hanssen found that electricity consumption in households correlates strongly with the use of appliances (Gram-Hanssen, 2011). According to Hayn et al., knowing consumer demographics, lifestyle and behavior is likely to help predict household electricity load (Hayn et al., 2014). It is an open research question, however, whether including socio-demographic characteristics and behavioral data can increase prediction accuracy beyond the accuracy of predictions based on historic smart meter data.

In 2018, smart meter deployment rate reached 21% in Austria (Energie-Control Austria, 2019) and 44% in Europe (Kochanski et al., 2020). If consumers consent to provide their smart meter data to energy management systems, past energy consumption can be a valuable input for electricity forecasts. However, energy consumption in individual households is a dynamic, highly volatile process, which is why the accuracy of predictions based on smart meter data alone is limited (Gajowniczek and Ząbkowski, 2014). Besides, consumer empowerment through active participation goes beyond merely accepting smart meter technology.

User-Centered Monitoring Software

The user-centered energy monitoring software developed in the GameOpSys project encourages active consumer participation. It acts as a communication channel where researchers can collect behavior data and simultaneously deliver system status reports or behavior change interventions to users. Integrating user feedback into data analysis allows researchers to improve consumption models and prediction accuracy. At the same time, the software system supports various intervention mechanisms to successfully induce changes in the consumer's knowledge, attitudes and beliefs about the energy system and changes in consumption behavior.

Through the UI, consumers are asked to provide two types of information: i) household characteristics and ii) dynamic information about planned behavior for the next day. Household characteristics include number, age and gender of household members, number and type of appliances, heating system and psychological characteristics such as personal norms and ascription of responsibility. The selection of these characteristics was guided by studies identifying determinants of household energy consumption (e.g. Hayn et al., 2014, Jones, Fuertes, and Loomas, 2015)

and were extended by psychological variables that are predictive for energy saving behavior (e.g., Wang et al., 2018) and for changes in energy consumption (Abrahamse & Steg, 2009). This information is used to improve prediction models for overall energy consumption and, in case the household employs electrical heating or cooling systems, adjust for seasonal changes. However, due to the stable nature of these variables, it is likely that their influence is already captured within smart meter data. The dynamic information consists of consumption schedules, predicting occupancy and indicating when the washing machine or other appliances will be used. This data helps to improve the accuracy of the projected load profile for the next day. Conversely, asking consumers to predict their own behavior increases the likelihood that they indeed act out this behavior in order to remain self-consistent (Spangenberg and Greenwald, 1999). It is a key objective to develop a more thorough understanding of the consumption patterns, to identify the best predictors for these consumption patterns, and to examine the potential user interaction and user engagement have in building simulation and modelling.

Communication is designed to be bidirectional. While collecting data, the system simultaneously supplies users with detailed information about their energy consumption, highlighting the consequences of their behavior. Providing feedback is a prominent and common behavior change technique in sustainable consumption interventions (Lehner et al., 2016; Fischer, 2008). Awareness of behavioral consequences can motivate people to act according to their values (Stern, 2000) and increase behavioral intention by incrementing perceived self-efficacy (Ajzen, 1985). Besides, feedback highlights differences between current and ideal outcomes, thereby motivating goal directed behavior (Carver and Scheier, 1998). Because the GameOpSys project plans to optimize energy prediction, it does not only inform users about energy consumption, but about prediction accuracy as well. Consumers can observe the extent to which accuracy depends on their active participation.

Given the opportunity, active consumer participation is only possible, if people are motivated to do so (Michie et al., 2014). To encourage regular interaction with the energy system, gamification elements are integrated. Gamification uses principles and elements of game-design, like achieving, exploring, competing, or connecting with other people. Implementing such elements in an intervention-tool stimulates users and increases engagement and motivation (Bartle, 1996). In the UI, consumers learn about their achievements through

feedback, points and badges depending on the prediction accuracy. This includes information about achievements of other users, which encourages social comparison and competition. Finally, we plan to provide an option to explore the relationship between behavior, energy consumption and energy prediction even further. Specifically, the UI will indicate time-frames where the prediction significantly diverges from the actual consumption and prompt users to re-check their behaviour during this time.

In the subsequent sections we describe the technological aspects of the system, outline the architecture and describe its components.

System Architecture

The system is designed as a data hub, routing communication between the users and data analysis services. Figure 1 shows the traversal of data through the system. It is collected in the Android application, forwarded to the server where it is processed by the data analysis services and then returned to the user as visualizations and forecasts.

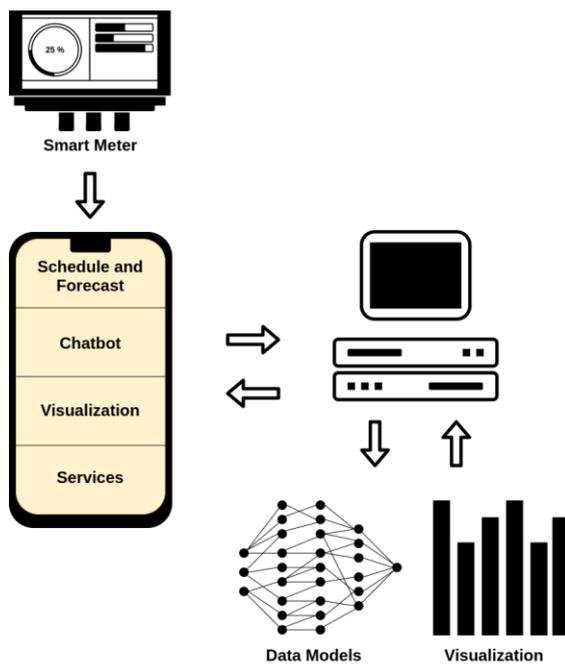


Figure 1. Schematic view of the system.

Subsequently, we describe the Android application (UI), its connection to the data storage (server) and the interfaces for the analysis and visualization services.

Front-End: Mobile Application

A substantial number of users as well as advances in mobile hardware, both in terms of computational power and sensing technology, confirm the smartphone as a suitable platform for data-collection, research and interventions (Lathia et al., 2013). Consequently, we chose to develop the UI as a mobile application. Prototypic development was confined to the Android framework. However, single components such as the server infrastructure, the API-definitions and the database are framework-agnostic. Thus, they can be reused if development is extended to iOS and/or a HTML5-based cross-platform version. The Android application was built from scratch in an agile software development process (Beck et al. 2001). The minimum API level requirement was set to 21 (Android 5.0 Lollipop), which allows us to target more than 89% of all active Android devices worldwide (Google, 2020). To ensure backward compatibility, uniform look and consistent behavior on different devices and API levels the app was built with components from the Jetpack suite in the AndroidX-namespace.

Data-visualizations are based around two groups of metrics: i) overall energy consumption in the household, and ii) projected usage of appliances. Actual consumption values, based on smart meter readings, are supplied by the grid operators. Consumers collect smart meter data from their grid operator's web portal and upload it through the app. The consumption data is selected, preprocessed and transformed on the server. It serves as a basis for visual usage statistics and future energy consumption estimates. Projected usage of appliances and occupancy is supplied by the users. Analysis services build data models based on historic smart meter data and user-generated schedules.

Figure 2 shows a bar-chart visualization where users can see their actual energy consumption compared to the energy consumption predicted by the data models. The prediction matrix shown in Figure 3 allows users to schedule their energy consumption. The screen displays various consumers (occupants and appliances) and users can mark the timeframes where they expect these consumers to be active.

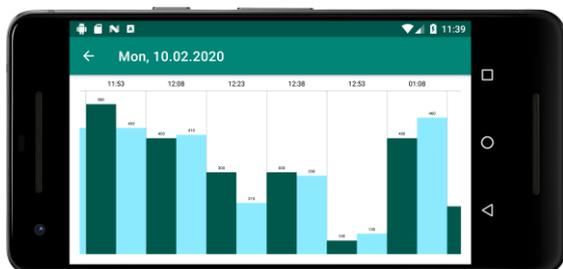


Figure 2. A window visualizing predicted and actual energy consumption.

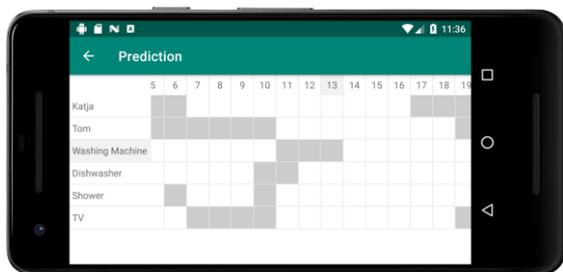


Figure 3. A prediction matrix, where users can schedule energy consumers in their households.

The graphical UI (GUI) is separated from the data access layer using the model–view–viewmodel (MVVM) pattern (Gossman, 2015). This prevents changes in the way data is retrieved from causing the need for changes in the GUI and vice-versa. Even when synchronization with the server is necessary the GUI has to be responsive and the data consistent. Thus, data-supply to the viewmodel is realized through observable, Android-lifecycle-aware, LiveData objects. This allows communication to be asynchronous and keeps the GUI up-to-date during Android-lifecycle events such as configuration changes (e.g. switching from portrait mode to landscape mode) or when the app is put into the background.

Data exchange between the app and the server is specified in an OpenAPI/2.0 document. The RESTful API definition provides a language-agnostic description and clearly defines the available endpoints (paths) on the server. The client SDK is auto-generated using Swagger's open-source code generator Codegen and integrated into the Android application as a module. Requests to the server are generated with Retrofit. Retrofit wraps the paths from the OpenAPI definition and ensures type safety for all API calls and responses. The need to synchronize data with the server, inverts control flow (Bainomugisha et al., 2013). Thus, it is necessary to apply a programming paradigm that allows the application to react to external events. The RxJava and RxAndroid extensions from the ReactiveX-library provide the necessary operators for the asynchronous, event-based calls between the Android application and the server.

Back-End: Server

To support independent deployment of components, the server is running an array of microservices (Fowler and Lewis, 2014). The software services bundle their own dependencies and configurations in virtual packages called containers. These containers are deployed, managed and updated through the Docker container engine.

Database

The core component is a document-based, distributed mongoDB database. It stores all data in JSON-like objects, which allows for flexible, dynamic schemas with nested structures.

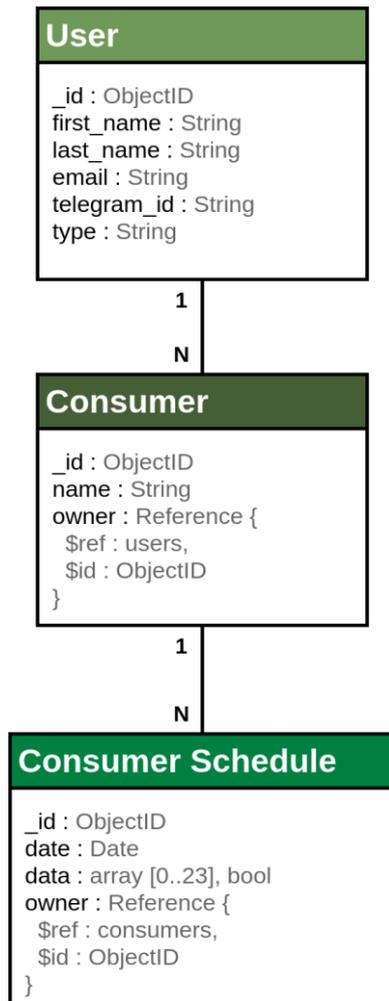


Figure 4. Data schema for consumers (appliances and occupants)

The data structure for the consumer schedules, i.e. the predictions about the expected consumption, and their relationship to user and consumer data can be seen in Figure 4.

A user designates a household, thus users can have any number of consumers, including occupants and appliances. Predictions about when each consumer is going to be active on a given day are modelled as consumer schedule objects which contain their date, a reference to the consumer they are a schedule for and a boolean array containing a 24-hour-grid. The overall household consumption is modelled through two objects: the predicted consumption, generated by the data models and the actual consumption based on the smart meter readings. Both objects contain a date and a 24-hour-grid with float values, representing the energy consumption for each hour of the day. Opposed to the consumption schedules, overall consumption is directly associated with a user.

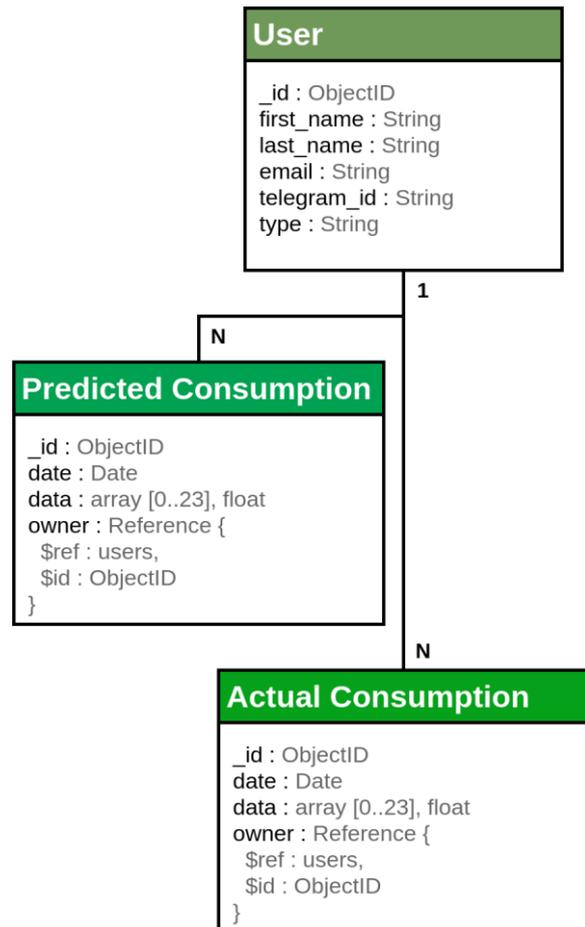


Figure 5. Data schema for overall household consumption.

Authentication

Because of the sensitive nature of the prediction and consumption data, it is a key objective to protect it from unauthorized access. To do so, the system supports two-factor authentication (2FA) which binds each user to a Telegram account. The mapping between Telegram id and user object is added manually whenever a new user is created. When users want to access their data through the app for the first time the app initiates the authentication process by sending the user’s Telegram id to the server. If the id exists in the database, i.e. there is a valid mapping between this id and a user object, the server sends a one-time password to the user’s Telegram account. The user is then given five minutes to access their account, obtain the one-time password and enter it into the app. The code is sent to the server and if it is valid, the server responds with a JSON-based web token (JSON web token) that the client can use for authentication during future communication. This authentication approach has two advantages over username-password authentication: i) users cannot forget their passwords, thus it is not necessary to implement a workflow to reset passwords and ii) users cannot choose weak passwords.

Web-Connection

The server runs a flask microservice that provides the endpoints specified through the API. The flask service is a compact web framework implemented in Python. It consists of a highly customizable, lightweight core and supports the integration of extensions. Flask does not have a built-in database abstraction layer, which separates the database implementation from the API. To keep the binding between the flask service and the database loose, i.e. to allow the database to be changed without having to change the flask service, we implemented a database abstraction layer. This class wraps data operations and provides a facade for the create, read, update and delete (CRUD) calls used by API-endpoints. The connexion framework validates requests and endpoint parameters and maps the API-endpoints to their respective Python implementations. Figure 6 contains a diagram visualizing the interaction.

Data Analysis

Developing data models and tools is an ongoing process. However, first analysis scripts and data models were implemented in Python using the visualization library seaborn and the statsmodels package for statistical computations. Data analysis components can be integrated into the server infrastructure as separate services in the form of docker containers. The docker engine supports deployment of isolated bundles. However, it allows services to communicate through well-defined channels. The mongoDB listens to all linked services within the docker environment on the default port. Thus, data analysis components can access household information directly through the database. However, it is possible to extend the API provided by the flask web service for remote database access.

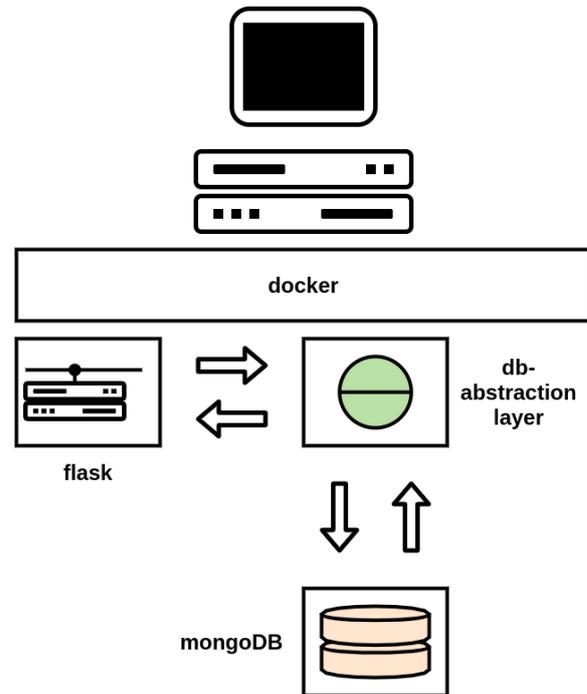


Figure 6. Schematic view of the server.

CONCLUSION

Active consumer participation is valuable to the operation of smart energy systems. Accurate predictions of load profiles provide the basis for numerous energy services such as flexibility identification, demand response, model predictive control or peer-to-peer trading. Active participation allows researchers to improve the accuracy of energy consumption models beyond the accuracy of standard load profiles, models based on socio-demographic characteristics or historic consumption data alone.

The user-centered energy management system (EMS) developed within the GameOpSys project collects behavior data which can be used in prediction models and energy services. Consecutively, prediction models and usage statistics are used to provide consumers with detailed information about their energy system. Simultaneously, the EMS can act as a means to deliver behavior change interventions. Identifying and highlighting behavioral consequences, providing feedback and highlighting the differences between actual and ideal outcomes can support consumers in adapting more sustainable habits.

REFERENCES

- Abas, N., Kalair, A. and Khan, N., 2015. Review of fossil fuels and future energy technologies. *Futures*, 69, pp.31-49.
- Ajzen, I., 1985. From intentions to actions: A theory of planned behavior. In *action control* (pp. 11-39). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Allouhi, A., El Fouih, Y., Kousksou, T., Jamil, A., Zeraoui, Y. and Mourad, Y., 2015. Energy consumption and efficiency in buildings: current status and future trends. *Journal of Cleaner production*, 109, pp.118-130.
- Bainomugisha, E., Carreton, A. L., Cutsem, T. V., Mostinckx, S., & Meuter, W. D. 2013. A survey on reactive programming. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 45(4), 1-34.
- Bartle, R., 1996. Hearts, clubs, diamonds, spades: Players who suit MUDs. *Journal of MUD research*, 1(1), p.19.
- Beck, K., Beedle, M., Van Bennekum, A., Cockburn, A., Cunningham, W., Fowler, M., Grenning, J., Highsmith, J., Hunt, A., Jeffries, R. and Kern, J., 2001. Manifesto for agile software development.
- Carver, C.S. and Scheier, M.F., 1998. *On the Self-Regulation of Behavior*. Cambridge University Press.
- Clarke, L., Böhringer, C. and Rutherford, T.F., 2009. International, US and EU climate change control scenarios: Results from EMF 22. *Energy Economics*, 31.
- Energy Information Administration (EIA). 2019. *Annual Energy Outlook with projections to 2050*.
- European Commission, 2019. *Energy performance of buildings*, viewed 30 January 2020, <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-performance-of-buildings>.
- Energie-Control Austria, 2019. *Bericht zur Einführung von intelligenten Messgeräten in Österreich*, viewed 21 January 2020, <https://www.econtrol.at/marktteilnehmer/strom/smart-metering/monitoring>.
- Fischer, C., 2008. Feedback on household electricity consumption: a tool for saving energy?. *Energy efficiency*, 1(1), pp.79-104.
- Fowler, M. and Lewis, J., 2014. Microservices a definition of this new architectural term, viewed 26 February 2020, <http://martinfowler.com/articles/microservices.html>
- Gajowniczek, K. and Ząbkowski, T., 2014. Short term electricity forecasting using individual smart meter data. *Procedia Computer Science*, 35, pp.589-597.
- Gobmaier, T., 2014. *Entwicklung und Anwendung einer Methodik zur Synthese zukünftiger Verbraucherlastgänge* (Doctoral dissertation, Technische Universität München).
- Google, 2020. *Distribution dashboard*, viewed 21 February 2020, <https://developer.android.com/about/dashboards>.
- Gossman, J., 2005. Introduction to Model/View/ViewModel pattern for building WPF apps. *MSDN Blogs*.
- Gram-Hanssen, K., 2011. Households' Energy Use - Which Is the More Important: Efficient Technologies or User Practices?.
- Hayn, M., Bertsch, V. and Fichtner, W., 2014. Electricity load profiles in Europe: The importance of household segmentation. *Energy Research & Social Science*, 3, pp.30-45.
- Jones, R. V., Fuertes, A., and Lomas, K. J., 2015. The socio-economic, dwelling and appliance related factors affecting electricity consumption in domestic buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, pp.901-917.
- Kochański, Maksymilian & Korczak, Katarzyna & Skoczkowski, Tadeusz. 2020. *Technology Innovation System Analysis of Electricity Smart Metering in the European Union*. *Energies*. 13. 916. 10.3390/en13040916
- Lathia, N., Pejovic, V., Rachuri, K.K., Mascolo, C., Musolesi, M. and Rentfrow, P.J., 2013. Smartphones for large-scale behavior change interventions. *IEEE Pervasive Computing*, 12(3), pp.66-73.
- Lehner, M., Mont, O. and Heiskanen, E., 2016. Nudging – A promising tool for sustainable consumption behaviour?. *Journal of Cleaner Production*, 134, pp.166-177.
- Lucon, O., Ürge-Vorsatz, D., Ahmed, A.Z., Akbari, H., Bertoldi, P., Cabeza, L.F., Eyre, N., Gadgil, A., Harvey, L.D., Jiang, Y. and Liphoto, E., 2014. *Buildings*.
- Michie, S., Atkins, L. and West, R., 2014. *The behaviour change wheel: a guide to designing interventions*. *Needed: physician leaders*, 26, p.146.
- Moshfegh, B. (Ed.), 2011. *World Renewable Energy Congress-Sweden*, Linköping, Sweden, 8–13 May, 2011, University Electronic Press, Linköping
- Spangenberg, E.R. and Greenwald, A.G., 1999. Social influence by requesting self-prophecy. *Journal of Consumer Psychology*, 8(1), pp.61-89.
- Stern, P. C., 2000. Toward a coherent theory of environmentally significant behaviour. *Journal of Social Issues*, 56(3), pp.407-424.
- Schweiger et al. 2020. *Active consumer participation in smart energy systems*. *Energy and Buildings* (under review).
- Uihlein, A. and Eder, P., 2009. Towards additional policies to improve the environmental performance of buildings. *European Commission, JRC-IPTS, EUR, 23775*.

- van Vuuren, D.P., Nakicenovic, N., Riahi, K., Brew-Hammond, A., Kammen, D., Modi, V., Nilsson, M. and Smith, K.R., 2012. An energy vision: the transformation towards sustainability—interconnected challenges and solutions. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(1), pp.18-34.
- Vazquez-Canteli J.R. and Nagy Z., 2019. Reinforcement learning for demand response: A review of algorithms and modeling techniques. *Applied Energy* 235, pp.1072–89.
- Verbong G.P., Beemsterboer S. and Sengers F., 2013. Smart grids or smart users? Involving users in developing a low carbon electricity economy. *Energy Policy*, 52, pp. 117–25.
- Wang, B., Wang, X., Guo, D., Zhang, B. and Wang, Z. 2018. Analysis of factors influencing residents' habitual energy saving behaviour based on NAM and TPB models: Egoism or altruism? *Energy Policy*, 116, pp. 68-77.

VIII: Gebäudetechnik

ENTWICKLUNG EINES THERMOELEKTRISCHEN HEIZ- UND KÜHLSYSTEMS MIT HOHEM WIRKUNGSGRAD

T. Blum¹, S. Carrigan¹, D. Platzek² und O. Kornadt¹

¹Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, Deutschland

²PANCO GmbH, Mülheim Kärlich, Deutschland

KURZFASSUNG

In diesem Beitrag wird über umfassende Untersuchungen sogenannter Peltier-Elemente berichtet, welche als kleine Wärmepumpen in einem neuartigen thermoelektrischen Heiz- und Kühlsystem fungieren. Aufbauend auf grundlegenden experimentellen Untersuchungen zur Analyse der Leistungs- und Funktionsfähigkeit der Peltier-Elemente werden thermische Bauteilsimulationen durchgeführt. Die Validierung der Simulationen durch den Vergleich mit den Messwerten gewährleistet die realitätsnahe Abbildung der Peltier-Elemente. Das resultierende Modell des Prototyps wird auf großformatige Wandsysteme erweitert. Es werden verschiedene Ausführungen des Systems in thermischen Bauteil- und Gebäudesimulationen untersucht, wodurch aufwendige experimentelle Versuchsreihen ersetzt werden. Erste Ergebnisse des in eine beispielhafte Wandkonstruktion integrierten Heizsystems weisen einen Systemwirkungsgrad von 1,8 auf.

ABSTRACT

In this paper comprehensive investigations of so-called Peltier elements are presented, which work like small heat pumps in an efficient novel thermoelectric heating and cooling system. Based on various fundamental experiments to analyse the performance and the efficiency of these Peltier elements, building components are simulated. A realistic approach to model the Peltier elements is ensured by comparing the results of the experimental test series with the various simulations. Within further simulations of building components and entire building systems, the resulting prototype is scaled up to realistic wall systems in order to avoid expensive and complex test series. First results show a system efficiency of 1,8.

EINLEITUNG

Zur Erreichung der ehrgeizigen Klimaschutzziele der EU, mit Blick auf die Herausforderung der Treibhausgasneutralität und angesichts zu erwartender Veränderungen des Außenklimas aufgrund des Klimawandels werden neuartige Systeme zur Heizung und Kühlung von Gebäuden benötigt.

Hier wird die Entwicklung eines thermoelektrischen Heiz- und Kühlsystems unter Verwendung von Peltier-Elementen vorgestellt. Peltier-Elemente sind kleine, auf Halbleitern basierende, thermoelektrische Wärmepumpen. Integriert in die Fassade transportieren sie im Heizfall Wärme aus der Umwelt ins Rauminnere. Durch Umkehr des Stromflusses wird zur Kühlung die Wärme aus dem Rauminneren entzogen und an die Umwelt abgegeben. Diese Flexibilität in Nutzung und Funktion der Peltier-Elemente birgt einige Besonderheiten und Herausforderungen bei Modellierung und Simulation des künftigen Systems.

Dabei können die Prozesse der Peltier-Elemente in den bewährten Bauteil- und Gebäudesimulationsprogrammen üblicherweise über deren thermische Einwirkungen auf die Konstruktion dargestellt werden. Um Aufschlüsse über die Leistungsfähigkeit der Wärmepumpen in den angedachten Konstruktionen unter bauüblichen Randbedingungen zu erhalten, ist eine experimentelle Untersuchung als Grundlage der Modellierung unumgänglich. Mit den daraus resultierenden Ergebnissen können die Simulationen validiert sowie die dreidimensionalen Wärmeströme und Temperaturverläufe auf Bauteilebene im stationären und im instationären Zustand analysiert werden. Diese Validierung ermöglicht anschließend eine Erweiterung der Simulationen auf großformatige Wandsysteme und ersetzt aufwendige experimentelle Untersuchungen unterschiedlich großer Prototypen.

Das Peltier-Element

Ein Peltier-Element ist ein thermoelektrischer Wandler, durch den bei der Leitung eines durchfließenden elektrischen Stroms Wärmeenergie von der einen zur anderen Seite des Elements transportiert wird (Peltier-Effekt). Umgekehrt wird bei einer anliegenden Temperaturdifferenz zwischen den beiden Seiten ein Stromfluss erzeugt. Die Elemente bestehen aus zwei Keramikplatten, zwischen denen zwei elektrisch leitende, thermoelektrisch aktive Materialien alternierend miteinander verbunden sind. Dabei werden die Keramikplatten meist auf Basis von Aluminiumoxid

hergestellt, da sie dadurch verglichen mit anderen Keramikmaterialien eine ausreichend gute Wärmeleitfähigkeit aufweisen, bei gleichzeitig guter elektrischer Isolation (Fichthorn, o. D.). Im Gegensatz dazu sollten die gewählten elektrischen Leiter einerseits eine gute elektrische Leitfähigkeit vorweisen und andererseits die thermische Leitung begrenzen. Diesen Anforderungen werden Halbleiter am ehesten gerecht. Zur Gewährleistung des für den Peltier-Effekt notwendigen Elektronentransports ist eine unterschiedliche Dotierung (p- oder n-Dotierung) der alternierenden Halbleiter erforderlich, d.h. darin werden Fremdatome eingebracht, die als Störstellen im Leitermaterial fungieren und gezielt dessen elektrische Leitfähigkeit verändern.

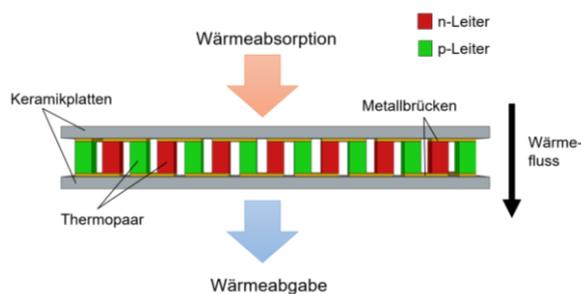


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Peltier-Elements und seiner Funktion

Bei der n-Dotierung besitzt jedes dieser Fremdatome ein zusätzliches negativ geladenes Elektron, das frei beweglich die elektrische Ladung transportiert. Umgekehrt besitzen die Fremdatome bei der p-Dotierung ein Elektron weniger als die Atome des Leitermaterials, was eine positive Ladung bewirkt. Die Kombination aus zwei jeweils unterschiedlich dotierten Halbleitern nennt man auch Thermopaar. Diese werden meist durch eine Kupferbrücke miteinander verlötet und sind elektrisch in Reihe und thermisch parallelgeschaltet (Paul et al, 2019).

An der Kontaktstelle zwischen den Halbleitermaterialien entstehen durch die Dotierungen unterschiedliche Fermi-Niveaus. Um von einem tieferen auf ein höheres Niveau zu gelangen, benötigen die Elektronen zusätzliche Energie. Diese Energie wird der Umgebung in Form von Wärmeenergie entzogen, wodurch sich die Keramikplatte an dieser Seite des Peltier-Elements abkühlt, und über die Elektronen zur anderen Keramikplatte des Peltier-Elements transportiert, wodurch sich diese erwärmt. Abbildung 1 zeigt schematisch einen Schnitt durch ein Peltier-Element und stellt dessen Funktionsweise dar.

Eine größere angelegte Stromstärke geht mit einer höheren Leistung der Wärmepumpe einher, mit resultierenden höheren Temperaturen auf der warmen Seite und entsprechend niedrigeren auf der kalten. Eine große Temperaturdifferenz intensiviert den

Wärmerückfluss, der sich durch Wärmeleitung und -strahlung zwischen den beiden Peltier-Seiten einstellt. Das führt zu kleineren Leistungskennzahlen, auch COP (coefficient of performance) genannt. Der COP ist als Verhältnis der Wärmeleistung des Peltier-Elements zur für dessen Betrieb erforderlichen elektrischen Leistung definiert. Geringe Stromstärken verringern die Leistung der Wärmepumpen bei gleichzeitig höherem COP (Noriega et al. 2006).

Somit ist die Leistungsfähigkeit maßgeblich von den thermischen Randbedingungen beeinflussbar. Es ist notwendig, eine ausreichend effektive Wärmezu- und -ableitung auf der kalten und eine effektive Wärmeableitung auf der warmen Seite zu gewährleisten. Unter idealen Bedingungen, mit geringen Stromstärken und effektiver Wärmezu- und -ableitung können Peltier-Elemente COPs größer als 4 erreichen (Peltier TEC12710T200 Datenblatt). Das bedeutet, dass mit 1 kW elektrischer Leistung mehr als 4 kW Wärme durch das Peltier-Element erzeugt werden.

Heiz- und Kühlsystem

Das im Rahmen eines Forschungsprojektes zu entwickelnde Heiz- und Kühlsystem basiert auf der Integration mehrerer dieser Peltier-Elemente in die innen- oder außengedämmte Fassade. Der Schwerpunkt liegt zunächst auf der Untersuchung der Wärmepumpen innerhalb einer Leichtbaukonstruktion. Im weiteren Projektverlauf wird das System auch für massive Wände erforscht.

Bei der geplanten Leichtbauwand werden die Peltier-Elemente hinter der Verkleidung der Innenoberfläche installiert und dabei mit einem wärmeleitfähigen Material sowie ebenso mit der Außenfassade thermisch kontaktiert. Die erdachte Konstruktion ermöglicht durch die Auswahl von gut wärmeleitenden Baustoffen eine effektive Wärmezufuhr auf der kalten sowie die erforderliche Wärmeableitung auf der warmen Seite. Die Wärmeströme der Peltier-Elemente lassen sich durch die Änderung der Stromrichtung umkehren, sodass die Innenoberfläche im Sommer gekühlt und im Winter beheizt wird.

METHODIK

Im ersten Schritt, den experimentellen Untersuchungen, dienen aufeinander aufbauende Versuchskonzepte einer umfangreichen Analyse der Peltier-Elemente. Die dabei gewählten Konstruktionen liefern wichtige Erkenntnisse und Ergebnisse für die im zweiten Schritt durchgeführten Simulationen. Zu Beginn der Versuchsreihen sind erste zweidimensionale Bauteilsimulationen erforderlich, durch die die Materialauswahl und die erdachten Konstruktionen bewertet und optimiert werden können. Aluminium erfüllt die an den Wärmeleiter gestellten thermischen Anforderungen und wird für die ersten Prototypen ausgewählt. Zur

effektiven thermischen Kontaktierung werden die einzelnen Elemente zusätzlich mit Wärmeleitpaste verbunden, um entstehende Luftschichten und daraus resultierende Störungen im Wärmestrom zu verhindern.

Experimentelle Untersuchungen

- Versuchsreihe 1

Ziel der ersten Versuchsreihe ist es, Aufschlüsse über die Funktionsweise von Peltier-Elementen zu erhalten, die mit bauüblichen Materialien kontaktiert und in einer Konstruktion installiert sind, in der die Wärmeströme begrenzt sind. Ferner werden die Einflüsse unterschiedlicher thermischer Randbedingungen und Stromstärken sowie die eindimensionalen Wärmeströme durch die Leiterstäbe analysiert. In Abbildung 2 ist die Versuchsskizze der durchgeführten Experimente zu sehen.

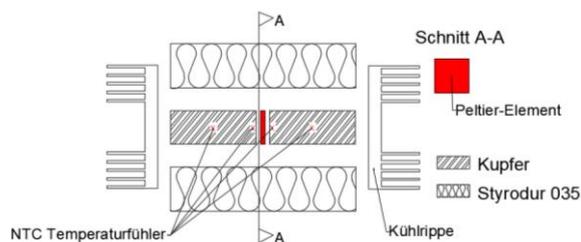


Abbildung 2: Skizze der Konstruktion der Versuchsreihe 1

Im Zentrum des Probekörpers ist das 4 x 4 x 0,36 cm große Peltier-Element zwischen zwei leitenden 10 cm langen Kupferstäben gleichen Querschnitts eingeschlossen. Eingepackt werden die drei Komponenten vollflächig in Wärmedämmung, um die Wärmeverluste in zwei Dimensionen zu minimieren und gleichzeitig den Wärmestrom in eine Richtung zu konzentrieren. In den Wärmeleitern sind jeweils am zum Peltier-Element gerichteten Rand sowie in der Mitte der Stäbe Löcher gebohrt, in denen NTC-Temperaturfühler eingebracht sind. Die am Ende der Stäbe befestigten Kühlrippen dienen der besseren Zu- und Abfuhr der Wärme in das und aus dem System. Unterschiedliche Randbedingungen werden mithilfe von Eiswasser und einer Wärmelampe erstellt. Zunächst werden die Peltier-Elemente bei Raumtemperatur betrieben. Anschließend wird der warmen Seite mithilfe des Eiswassers effektiver die Wärme entzogen und gleichzeitig strahlt die Wärmelampe Wärme über die kalte Seite in das System. Zur Simulation winterlicher Randbedingungen wird abschließend die kalte Seite mit Eiswasser gekühlt und die warme Seite behält den Kontakt zur Raumtemperatur des Labors.

- Versuchsreihe 2

Im zweiten Versuchsaufbau wird die oben vorgestellte Leichtbaukonstruktion im Labor errichtet. Zunächst erfolgen die Untersuchungen ohne Verkleidung und die Temperaturen werden an der wärmeleitenden Platte gemessen. Anschließend wird diese Konstruktion auf der Raumseite mit einer Gipskartonplatte und auf der gedachten Außenseite mit einer zementgebundenen Leichtbetonplatte verkleidet und die Temperaturen mithilfe von je vier NTC-Sensoren (Gipskartonplatte: NTC-01 bis -04) auf beiden Oberflächen gemessen (Abbildung 3). In dieser Versuchsreihe werden die Prüfkörper zunächst im Labor bei Raumtemperatur untersucht. Das Hauptaugenmerk liegt auf der dreidimensionalen Wärmeverteilung auf der Aluminiumplatte, bzw. anschließend auf Gipskarton und Leichtbeton.



Abbildung 3: verkleideter Prüfkörper der Leichtbaukonstruktion der Versuchsreihe 2

Simulationen

Mithilfe von TRISCO (TRISCO), VOLTRA (VOLTRA) und WUFI (WUFI@2D) wird das Heiz- und Kühlsystem zunächst auf Bauteilebene untersucht. Durch die Simulationsprogramme werden der stationäre und der instationäre Wärmetransport analysiert sowie die erforderlichen Leistungen im Heiz- und im Kühlfall mit den sich dabei einstellenden Temperaturprofilen im Außenbauteil und an der Bauteiloberfläche ermittelt. Im ersten Schritt erfolgt eine Überprüfung, ob das System mit besagten Programmen realistisch abbildbar ist. Hierzu werden die Versuchskörper der Versuchsreihe 2 zusammen mit den äußeren Randbedingungen im Labor mit und ohne Verkleidung modelliert. Basierend auf den hierbei gewonnenen Erkenntnissen werden mithilfe von thermischen Gebäudesimulationen in TRNSYS (TRNSYS 18) unterschiedliche Dimensionierungsvarianten des Gesamtsystems analysiert.

- TRISCO und VOLTRA

TRISCO und VOLTRA sind auf Finiten Elementen basierende Simulationsprogramme der Firma Physibel, mit denen man zwei- und dreidimensionale thermische Simulationen orthogonaler Bauteile durchführen kann. TRISCO ist auf stationäre Zustände beschränkt, während mit VOLTRA auch instationäre Bedingungen berücksichtigt werden können.

Untersucht werden sowohl die verkleideten Probekörper als auch jene ohne vorgesetzte Gipskarton- und Leichtbetonplatten. Zu beachten ist dabei, dass bei der Eingabe der unverkleideten Wandkonstruktionen der geringe Emissionsgrad des Aluminiums berücksichtigt werden muss. Dieser fließt mit ein in die Berechnung der Wärmeübergangswiderstände nach DIN EN ISO 6946 (DIN EN ISO 6946, 2018) und der entsprechende Wärmeübergangswiderstand wird der an das Aluminium grenzenden Luftschicht zugeordnet. Für die unverkleidete Konstruktion ergibt sich so ein Wärmeübergangskoeffizient von $2,75 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Dieser Wert wird in den durchgeführten Simulationen in den angrenzenden Luftschichten hinterlegt. Dagegen werden die Wärmeübergangskoeffizienten der verkleideten Probekörper nach besagter Norm mit $7,69 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ für horizontal gerichtete Wärmeströme im Innenraum angesetzt. Eigene Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass je nach Wandsituation (z. B. Wärmebrücke oder ungestörte Wand) der Wärmeübergangskoeffizient zwischen $5,0 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ und $9,0 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ liegen kann. Diese Bandbreite wird bei der Bestimmung der Wärmeströme berücksichtigt.

Die durch das Peltier-Element erzeugte Wärme wird als eine Grenzflächenrandbedingung modelliert. Dabei wird in der Grenzfläche zwischen zwei Materialien eine Temperatur vorgegeben. Den beiden Peltier-Seiten wird je ein eigenes Material zugeordnet. Zwischen diesen Peltier-Materialien und den angrenzenden Aluminiumbauteilen wird jeweils eine Grenzfläche definiert. Im stationären Zustand in TRISCO sind die beiden hinterlegten Temperaturen konstant. Diese Temperaturen werden aus den Messdaten der Versuchsreihe 2 zu dem Zeitpunkt entnommen, an dem sich die Temperaturverläufe annähernd stationär verhalten. Für die instationäre Betrachtung werden die am Peltier-Element mit einer Abtastrate von $0,5 \text{ Hz}$ gemessenen Temperaturverläufe zum Vergleich zwischen Simulation und Versuchsreihe in VOLTRA als Funktion gespeichert. Die beiden Funktionen der Warm- und der Kaltseite ersetzen die konstanten Temperaturen im Eingabefeld der Grenzflächenrandbedingung.

Ferner ermöglicht VOLTRA neben der grafischen Analyse der Wärmeströme die Definition von Ausgabeknoten, mit denen über die Berichtsdefinition virtuelle Temperaturfühler modelliert werden können.

Diese werden analog zu den am Versuchskörper angebrachten NTC-Fühlern positioniert.

Nach der Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse in den Simulationsprogrammen werden die Probekörper zu realistischen Wandaufbauten erweitert und auf entsprechende Abmessungen vergrößert. Abbildung 4 zeigt eine beispielhafte Modellwand, mit der die für den Erhalt einer Normraumtemperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ erforderlichen Oberflächentemperaturen für verschiedene Leistungen der Peltier-Elemente und realistische Klimarandbedingungen bestimmt werden (Hofmann et al. 2017). Ermittelt werden die erforderlichen Oberflächentemperaturen durch Bilanzierung der Wärmeverluste eines beispielhaften 50 m^3 großen Raumes, der durch das Wandbauteil von der $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ warmen Außenluft getrennt ist. Die Betrachtung der Wärmeströme und -verluste erfolgt zunächst stationär. Je nach Leistung der Peltier-Elemente liegt die erforderliche Oberflächentemperatur zwischen $23 \text{ }^\circ\text{C}$ und $24 \text{ }^\circ\text{C}$, da durch die höhere Temperatur der Innenoberfläche der aktivierten Wandkonstruktion größere Wärmeströme als Verluste nach außen treten.

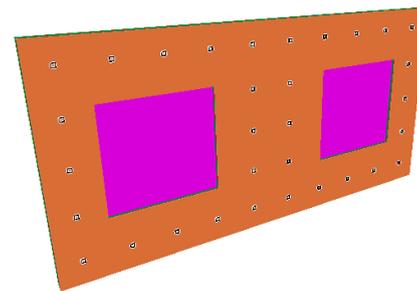


Abbildung 4: TRISCO/VOLTRA Modell einer beispielhaften Wand mit zwei Fenstern (lila) und 32 Peltier-Elementen

Die Wand besitzt denselben Aufbau wie die Versuchswände und ist in den Abmessungen $5,0 \times 2,5 \text{ m}$ mit zwei identischen $1,20 \times 1,20 \text{ m}$ großen Fenstern abgebildet. Der Fensteranteil beträgt somit ca. 25%. Die insgesamt 32 Peltier-Elemente sind zueinander in einem Abstand von 50 cm und zu den Außenkanten mit 25 cm Abstand angeordnet. Zu den Fenstern haben die Peltier-Elemente in der Horizontalen einen Abstand von 50 cm zur Mitte der Wand hin und von 30 cm an den Randbereichen sowie vertikale Abstände von 40 cm . Um die Simulationsergebnisse unterschiedlicher Ausführungen vergleichen zu können, werden diese mit den erforderlichen Oberflächentemperaturen verglichen.

- WUFI

Das Programm WUFI berücksichtigt zusätzlich zum Wärmetransport auch den daran gekoppelten Feuchtetransport im Bauteil.

Zunächst werden damit die instationären Wärmetransportvorgänge im System analysiert. Zukünftige Betrachtungen legen den Schwerpunkt auf den Feuchtetransport innerhalb der Konstruktion. Durch die wegen der Peltier-Kühlung auf der Kaltseite des Peltier-Elements im Winter zu erwartenden Temperaturen um den Gefrierpunkt ist eine Betrachtung der Feuchtigkeit im Wandinneren bezüglich Tauwasserausfall und Eiskristallbildung notwendig. Auch hierfür ist eine Validierung des Programms durch den Abgleich mit den in den Versuchen gemessenen Temperaturen erforderlich.

Die Hinterlegung der thermischen Einwirkungen der beiden Seiten des Peltier-Elements als Wärmequelle und -senke im Dialog Sources erweist sich für die Validierung als unpraktikabel. Die Eingabe einer Funktion in W/m erfordert entsprechende Messdaten, die aus den experimentellen Untersuchungen nicht hervorgehen.

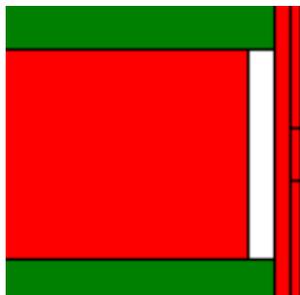


Abbildung 5: Ausschnitt des WUFI-Modells der Versuchsreihe 2 (unverkleidet) mit Darstellung des modellierten Peltier-Elementes

Für eine zweite Variante werden *.KLI-Klimadateien erstellt und die gemessenen Temperaturen der Versuchsreihe mit der minimalen Intervallgröße im Programm von 0,01 h (36 s) gespeichert. Die Temperaturen der Versuchsreihe 1 werden unmittelbar am Peltier-Element gemessen. Bei der Versuchsreihe 2 werden die Temperaturen der Kaltseite ebenfalls unmittelbar am Peltier aufgenommen, die Messung der Temperatur der Warmseite erfolgt hingegen auf der Außenseite der Aluminiumplatte. Die in der Simulation maßgebenden Temperaturen für die Warmseite des Peltier-Elements sind durch die Wärmeleitung und durch die Wärmespeicherung in der Aluminiumplatte um etwa 0,6 K geringer als die Peltier-Temperaturen im Versuchsaufbau. Dies wird in der Versuchsauswertung berücksichtigt. Abbildung 5 stellt das maßgebende Detail des in WUFI hinterlegten Modells des unverkleideten Wandaufbaus der Versuchsreihe 2 dar.

Auf dem Screenshot sind in Rot die Aluminiumbauteile und in Grün die Dämmschicht erkennbar. Der weiße Bereich kennzeichnet das Peltier-Element und ist im Dialog Geometry nicht explizit definiert, sondern bildet eine Lücke in der

Konstruktion. Dies ermöglicht die Definition von zwei Klimarandbedingungen an den an das Aluminium angrenzenden Randflächen, die wie oben beschrieben mit den jeweiligen Messwerten verknüpft sind. Die Grenzflächen zur Wärmedämmung sind adiabat.

- TRNSYS

TRNSYS ist ein thermisches Gebäudesimulationsprogramm zur Analyse von instationären Systemen. Mit dessen Hilfe werden im Projekt unterschiedliche Dimensionierungsvarianten anhand thermischer Gebäudesimulationen verglichen. Die Simulationsergebnisse auf Bauteilebene der zuvor beschriebenen Programme dienen dabei als Grundlage für die Modellierung des Gesamtsystems.

ERGEBNISSE

Experimentelle Untersuchungen

- Versuchsreihe 1

Die Grundlagen-Versuchsreihen dienen einer ersten Evaluation der Leistung der Peltier-Elemente unter Verwendung unterschiedlicher Stromstärken zwischen 0,25 A und 2,0 A. Da die Peltier-Elemente stark von den äußeren Randbedingungen beeinflusst werden, sind die Ergebnisse lediglich für Konstruktionen in Systemen mit vergleichbaren thermischen Voraussetzungen aussagekräftig. Dennoch liefert die Versuchsauswertung wichtige Erkenntnisse zur Funktionsweise der Wärmepumpen. Tabelle 1 zeigt die mithilfe der Peltier-Elemente erreichten maximalen und minimalen Temperaturen (siehe auch Abbildung 6) in der Mitte des Leiterstabes in 0,5 A Schritten sowie die durchschnittliche Raumtemperatur während der Versuchsdurchführung und die Differenz der minimalen bzw. maximalen Temperatur zur Raumtemperatur.

Tabelle 1:

max. T und min. T in °C in Abhängigkeit von der Stromstärke in A, mit Differenz zur Raumtemperatur

	0,5 A (1,5 V)	1,0 A (3,2 V)	1,5 A (5,0 V)	2,0 A (6,9 V)
MAX. T [°C]	28,7 + 8,0	37,1 + 16,5	51,7 + 28,3	61,7 + 41,0
MIN. T [°C]	16,4 - 4,3	14,4 - 6,2	11,5 - 11,9	12,8 - 7,9
RAUM- TEMPERATU R [°C]	20,7	20,6	23,4	20,7

Wie zu erwarten ist, steigt die Temperaturdifferenz zwischen den Versuchstemperaturen und der Raumluft mit Zunahme der Stromstärke sowohl auf der kalten als auf der warmen Seite an. Jedoch entzieht das Peltier-Element bei 1,5 A auf der kalten Seite mehr Wärmeenergie als bei der höheren Stromstärke

von 2,0 A, da die Leistungsfähigkeit der Peltier-Elemente dann am höchsten ist, wenn der Temperaturunterschied zwischen warmer und kalter Seite gering bleibt. Bei 2,0 A ist dieser Unterschied so groß, dass die entzogene Wärmemenge kleiner bleibt als bei 1,5 A.

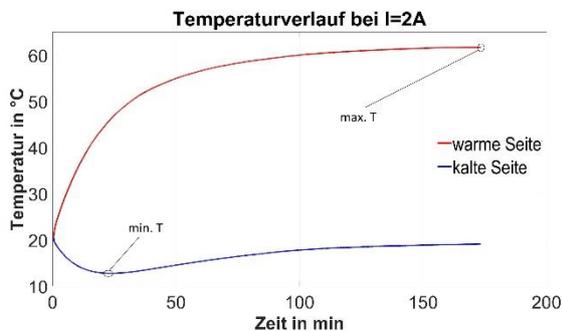


Abbildung 6: Temperaturverlauf der Messsensoren auf der warmen und kalten Peltier-Seite

Maßgebend wird dieser Effekt durch den eintretenden Wärmerückfluss und die im Peltier-Element erzeugte Joule'sche Wärme beeinflusst, sodass das Peltier-Element im Versuch bei 1,5 A auf der kalten Seite der Umgebung mehr Wärme entzieht als bei 2,0 A. Etwa nach 20 Minuten ist der in Abbildung 6 dargestellte Temperaturunterschied zwischen warmer und kalter Seite so hoch, dass durch die oben aufgeführten Effekte mehr Wärme auf die kalte Seite transportiert wird, als diese aus der Umgebung entziehen kann. Folglich steigt ab diesem Zeitpunkt die Temperatur der blauen Kurve wieder fast bis zum anfänglichen Wert.

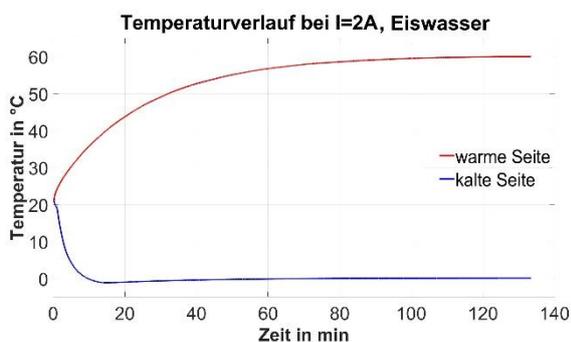


Abbildung 7: Temperaturen der warmen und kalten Seite des Peltier-Elements, bei Platzierung der kalten Seite in Eiswasser

Die Randbedingungen dieser ersten Versuche entsprechen allerdings nur bedingt denen des geplanten Heiz- und Kühlsystems. Interessanter für dessen Dimensionierung ist eine Betrachtung, bei der die kalte Seite in einer Umgebung um die 0 °C liegt und die warme einen Innenraum beheizt. Durch die Platzierung der Kühlrippen der kalten Seite des

Versuchskörpers in Eiswasser wird diese Situation simuliert.

Wie in Abbildung 7 zu sehen ist, erreicht die kalte Seite unter Kontakt mit Eiswasser nur kurzzeitig Temperaturen unter 0 °C und pendelt sich dann auf dem Nullpunkt ein. Da zur Entstehung eines Wärmestromes eine Temperaturdifferenz erforderlich ist, müsste die kalte Peltier-Seite geringere Temperaturen erreichen als das null Grad kalte Eiswasser. Wie bei den obigen Versuchsaufbauten bei Raumtemperatur verhindern der Wärmerückfluss und die Joule'sche Wärme langfristig Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes.

- Versuchsreihe 2

Mithilfe der Probekörper der Versuchsreihe 2 wird die dreidimensionale Wärmeverteilung auf den Oberflächen der Leichtbaukonstruktionen untersucht. Ferner wird die mittlere Oberflächentemperatur mit der für die beispielhafte Wand bilanzierten, erforderlichen Oberflächentemperatur verglichen. Abbildung 8 stellt diesen Vergleich für die verkleidete Konstruktion bei einer Stromstärke von 1,0 A dar.

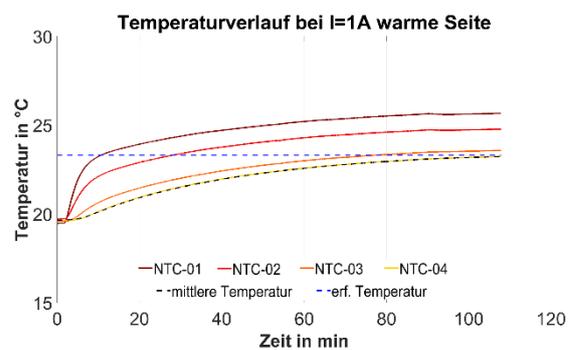


Abbildung 8: Oberflächentemperaturen der verkleideten Versuchskonstruktion, warme Peltier-Seite

Der Temperaturverlauf von innen nach außen ist an den vier durchgängigen Linien zu erkennen. Je näher die NTC-Sensoren am Peltier-Element in der Mitte der Platte positioniert sind, desto höher ist deren gemessene Temperatur. Die gestrichelte schwarze Linie kennzeichnet die mittlere Oberflächentemperatur und deckt sich mit der gelben Linie des äußersten Temperaturfühlers. Sie schneidet etwa ab Minute 100 die blau gestrichelte Gerade der erforderlichen Wandtemperatur.

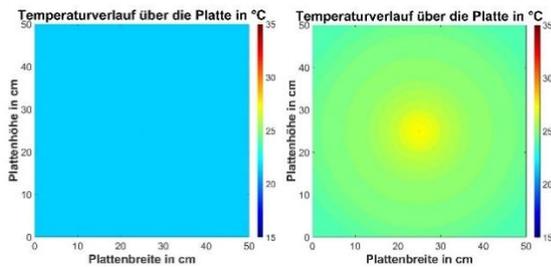


Abbildung 9: Temperaturentwicklung der Oberfläche der verkleideten Wand – links: Beginn der Messung; rechts: Ende der Messung

Durch die Trägheit des thermischen Systems ist zur Erreichung der erforderlichen Temperatur eine gewisse Vorlaufzeit notwendig. Die Temperaturentwicklung des über der Aluminiumplatte liegenden Bereiches der Gipskartonplatte wird in Abbildung 9 veranschaulicht.

Tabelle 2:
Systemwirkungsgrade und Vergleich der Oberflächentemperaturen der verkleideten Wand im Labor

	0,5 A (1,8 V)	1,0 A (4,5 V)	1,5 A (6,7 V)	2,0 A (7,7 V)
MITTL. OBERFLÄCHENTEMPERATUR [°C]	21,8	23,4	25,3	27,8
RAUM-TEMPERATUR WÄHREND DER VERSUCHE [°C]	20,5	19,8	19,7	19,7
ERF. OBERFLÄCHENTEMPERATUR [°C]	23,3	23,4	23,7	24,0
WIRKUNGSGRAD	2,8 oder 1,8-3,3	1,5 oder 1,0-1,8	1,1 oder 0,7-1,3	1,0 oder 0,7-1,2

In Tabelle 2 sind die Systemwirkungsgrade dargestellt. Jeweils der zuerst aufgelistete Wirkungsgrad wird unter Annahme eines normativen Wärmeübergangskoeffizienten ($h = 7,69 \text{ W/m}^2\text{K}$) bestimmt. Die untere Angabe der Bandbreite beschreibt die Ergebnisse bei Betrachtung der Grenzwerte $5,0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ und $9,0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Zur Berechnung des Systemwirkungsgrades werden der von der Wandoberfläche in das Rauminnere geleitete Wärmestrom ins Verhältnis zur erforderlichen elektrischen Leistung beim Betreiben des Peltier-Elements gesetzt. Der zur Ermittlung der Wärmeströme benötigte Temperaturunterschied bezieht sich dabei auf die Labor-Raumtemperatur während der Versuchsdurchführung. Unter thermischen Randbedingungen mit konstanter Labor-Raumtemperatur sind die Systemwirkungsgrade bei normativer Betrachtung mindestens 1,0.

Außerdem sind in der Tabelle die vorhandenen mittleren Oberflächentemperaturen den erforderlichen gegenübergestellt. Lediglich der Versuchsdurchlauf unter einer Stromstärke von 0,5 A erreicht die erforderlichen Temperaturen nicht. Nur für gemäßigte Außentemperaturen (ab 11 °C) ist die Wärmeleistung bei dieser Stromstärke ausreichend, um die durch die geringeren Temperaturunterschiede zwischen Raum- und Außenluft entstehenden kleineren Wärmeverluste auszugleichen.

Simulationen

- TRISCO und VOLTRA

Die Validierung von VOLTRA zeigt, dass die instationären thermischen Auswirkungen der Peltier-Elemente auf die Versuchskonstruktion realitätsnah simuliert werden (Tabelle 3). Die stationäre Betrachtung in TRISCO führt hingegen zu größeren Diskrepanzen. Grund hierfür ist die thermische Trägheit der Materialien. Experimentell verteilt sich die Wärme instationär im System, während TRISCO die Auswirkungen für den stationären Endzustand berechnet.

Tabelle 3:
Vergleich der Messdaten aus der Versuchsreihe 2 (verkleidet bei 2 A) mit den in VOLTRA simulierten Ergebnissen

	NTC-1	NTC-2	NTC-3	NTC-4
VERSUCHE [°C]	33,3	31,2	28,7	27,9
SIMULATION [°C]	32,9	31,5	28,9	27,8
DIFFERENZ [K]	-0,4	0,3	0,2	-0,1

Die validierten Simulationen lassen sich anschließend auf großformatige Wandsysteme erweitern. Wie in Abbildung 10 zu sehen ist, liegt das Hauptaugenmerk dabei auf der Wärmeverteilung auf der Innenoberfläche.

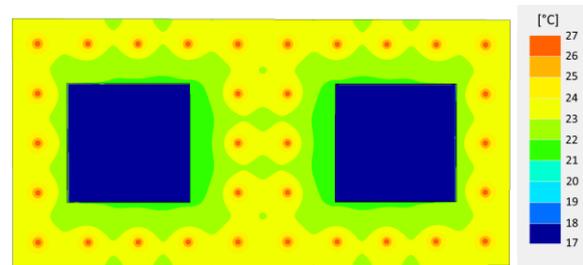


Abbildung 10: Temperaturverlauf der in TRISCO simulierten Beispielwand aus Abbildung

Unmittelbar am Peltier Element erreichen diese Temperaturen von bis zu 27 °C. Im Mittel liegt die Oberflächentemperatur bei 23,4 °C. Bei einer Innenraumtemperatur von 20 °C heizt das System den Raum folglich mit einem Wärmestrom zwischen 17,0 W/m² ($h = 5,0 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$) und 30,9 W/m² ($h = 9,0 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$), bzw. nach Norm ($h = 7,69 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$) von 26,2 W/m². Das entspricht, für den normativen Wärmeübergangswiderstand, einer Wärmeleistung von 252 W. Bei dieser Simulation sind die Messwerte einem Versuch entnommen, in dem das Peltier-Element mit 1,0 A und 4,5 V betrieben wird und eine maximale Temperatur von 31,0 °C erreicht.

Unter der Annahme, dass für jedes Peltier-Element die gleiche elektrische Leistung erforderlich ist wie in den experimentellen Untersuchungen, ergibt sich ein Systemwirkungsgrad von 1,8 (bzw. 1,2 – 2,1).

- WUFI

Die Ergebnisse der WUFI-Validierung weisen, wie in Tabelle 4 zu sehen ist, größere Diskrepanzen zwischen den experimentellen Untersuchungen und den Simulationen auf.

*Tabelle 4:
Vergleich der Messdaten aus der Versuchsreihe 2
(unverkleidet bei 2,0 A) mit den in WUFI simulierten
Ergebnissen*

	NTC-1	NTC-2	NTC-3	NTC-4
Versuche [°C]	44,7	39,9	36,7	35,4
Simulation [°C]	43,2	40,8	37,1	34,8
Differenz [K]	-1.5	0.9	0.4	-0.6

Wie zu erwarten, liegt die simulierte Temperatur beim ersten NTC unterhalb des Messwertes, da die hinterlegte Temperatur nicht unmittelbar am Peltier-Element gemessen wird. Diese berücksichtigt somit bereits Verluste durch die Speicherfähigkeit des Aluminiums. Die Temperaturen der Simulation sind folglich nach oben zu korrigieren. Während die Werte für die NTCs 1 und 4 dadurch näher an die Versuchsergebnisse rücken, wächst die Diskrepanz bei den NTCs 2 und 3.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Durch die Kombination aus experimentellen Untersuchungen und Simulationen mithilfe bewährter Bauteil- und Gebäudesimulationsprogramme lässt sich das vorgestellte thermoelektrische Heiz- und Kühlsystem umfassend erforschen.

Die durchgeführten Versuchsreihen dienen in erster Linie der Analyse der Wärmeströme innerhalb der Konstruktion sowie der Untersuchung der Funktionsweise und Leistungsfähigkeit der Peltier-

Elemente unter gebäudetypischen Randbedingungen. Ferner bilden sie die Grundlage, auf denen die Simulationen aufbauen und ermöglichen so deren Erweiterung auf großformatige Wandsysteme. Die daraus folgenden Simulationen ersetzen aufwendige experimentelle Versuchsreihen an großen Prototypen.

Erste Ergebnisse zeigen, dass das thermoelektrische Heiz- und Kühlsystem einen Systemwirkungsgrad von etwa 1,8 erreicht und die Innenoberflächen auf die erforderlichen Temperaturen beheizen kann. Zur Validierung sind sowohl weitere Simulationen als auch zusätzliche experimentelle Untersuchungen erforderlich.

Im nächsten Schritt werden die Leichtbaukonstruktionen mit den Peltier-Elementen in einem Kubus im Freien untersucht, um die Funktions- und Leistungsfähigkeit unter realen klimatischen Bedingungen zu analysieren. Zusätzlich erfolgen weitere Betrachtungen auf Bauteilebene mithilfe der vorgestellten Simulationsprogramme. Anschließend werden anhand thermischer Gebäudesimulationen verschiedene Dimensionierungsvarianten verglichen.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

LITERATUR

- DIN EN ISO 6496: Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren, 2018. Deutsches Institut für Normung, Deutschland.
- Fichthorn, H. (o. D.). Grundlagen-Peltier, SITUS Technicals GmbH, Deutschland.
- Hofmann, M.; Geyer, C.; Kornadt, O., 2017. Bemessung des Wärmeschutzes der Gebäudehülle auf der Grundlage von Raumklimamessungen. In: Bauphysik-Kalender 2017, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin.
- Noriega, G., Villasevil, F., Lopez, A., Platzek, D., 2006. Acquisition of data curves in a thermoelectric system, Wien, Österreich.
- Paul, S., Paul, R., 2019. Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik 2, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, Deutschland.
- Peltier TEC-12710T200 Datenblatt. Aufgerufen 27. Februar 2020
- TRISCO version 12.0w: computer program to calculate 3D & 2D state heat transfer in rectangular objects, Physibel, Gent, Belgien

TRNSYS 18: Transient System Simulation Tool, Madison, WI, USA: Thermal Energy System Specialists.

VOLTRA version 7.0w: computer program to calculate 3D & 2D transient heat transfer in objects described in a rectangular grid using the

energy balance technique, Physibel, Gent, Belgien

WUFI@2D V.3.4.2.181.DB.24.78, Fraunhofer Institut für Bauphysik, Holzkirchen.

EXPERIMENTELLE VALIDIERUNG VON SIMULATIONSMODELLEN AN EINEM HARDWARE-IN-THE-LOOP WÄRMEPUMPENPRÜFSTAND

S. Hummel¹, C. Betzold¹, K. Kandasamy¹, S. Bordin¹, G. Harhausen¹ und A. Dentel¹

¹Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, Nürnberg, Deutschland

KURZFASSUNG

Basierend auf einer experimentellen Messkampagne werden zwei Simulationsmodelle mit unterschiedlichen Modellierungstiefen, welche die Anlagenkomponenten einer Sole-Wasser-Wärmepumpe und eines thermischen Energiespeichers abbilden, validiert. Auf Grundlage von Referenzlastprofilen nach VDI 4655 werden Messungen an einem Hardware-in-the-Loop Wärmepumpenprüfstand unter realitätsnahen Betriebsituationen und Randbedingungen durchgeführt.

Die Validierungsergebnisse zeigen generell eine hohe Genauigkeit des detaillierten Modells gegenüber den gemessenen Systemgrößen, aber auch dem vereinfachten Modell, auf. So können beispielsweise absolute Fehler im Ladezustand des Speichers von höchstens 7,2 Prozentpunkten und von der mittleren Speichertemperatur von 1,4 °C ermittelt werden. Der Einsatz des detaillierten Modells ist für eine zukünftige Entwicklung von Regelungsstrategien zu bevorzugen.

ABSTRACT

An experimental validation of two different kind of system simulation models, which both imply a brine/water heat pump as well as a thermal energy storage are carried out. Based on daily load profiles in accordance with VDI 4655, measurements on a hardware-in-the-loop heat pump test bench are performed to evaluate the system components under realistic operating conditions.

The validation results confirm the high accuracy of the detailed system model compared to both our measured system parameters and the simplified model. An absolute error of the state of charge and the mean storage temperature of up to 7.2 percentage points and 1.4 °C is determined, respectively. The use of a detailed model for any further heat pump control development is recommended.

EINLEITUNG

Die steigenden Anforderungen an eine möglichst flexible Betriebsweise von Wärmepumpen (WP) erfordern innovative Regelungsstrategien, die unter Einbezug von externen Einflüssen einen netzdienlichen, eigenverbrauchs-, kosten- oder energetisch-

optimierten Betrieb gewährleisten. Dies kann zum Beispiel durch eine regelungstechnische Anpassung an flexible Stromtarife oder an die fluktuierende Erzeugung aus erneuerbaren Energien erfolgen. Speziell die Kombination aus elektrisch betriebenen WP und thermischen Energiespeichern (TES) birgt dabei ein hohes Einsatz- und Optimierungspotential (Arteconi et al. 2013, Heinrich-Böll-Stiftung 2018, Dentel et al. 2019), da hierdurch eine Lastverschiebung mittels der Speicherung von sensibler Wärme von zeitweise überschüssigem Netz- oder Eigenstrom realisiert werden kann. Battaglia et al. (2017) schlussfolgern aus Systemsimulationen, dass durch den Betrieb einer WP, vorwiegend in Zeiten hoher solarer Einstrahlung, der Eigenstromanteil aus einer Photovoltaikanlage erhöht und der Strombezug aus dem Netz um 11 % reduziert werden kann. Psimopoulos et al. (2016) untersuchten simulativ unterschiedliche Regelungsstrategien. Die Autoren konnten durch den Einsatz eines geeigneten TES einen Anstieg des Eigenstromanteils um bis zu 15 % und eine Verringerung des Endenergiebedarfs um 8 % ermitteln.

Neuartige Regelungsstrategien für den Wärmepumpenbetrieb, wie zum Beispiel modellprädiktive Regelungen (Verhelst 2012, Buderus et al. 2016, Felten & Weber 2017) berücksichtigen unter anderem auch Wetter- und Lastprognosen. Mit modellbasierten Optimierungsverfahren kann die Betriebsweise einer technischen Anlage im gewählten Prognosehorizont kosten- und leistungsoptimiert gesteuert werden. So berichten Halvgaard et al. (2012) aber auch Finck et al. (2017) von Stromkostensparnissen von bis zu 35 % bzw. 44 % im Vergleich zu konventionellen Wärmepumpensteuerungen.

In vorangegangenen Arbeiten wurden hierzu einfache, aber auch detailliertere Ansätze zur Modellierung von WP, TES und der Gebäudeheizlast entwickelt, welche sich in ihrer Rechenzeit und ihren Einsatzmöglichkeiten unterscheiden (Fischer et al. 2014, Buderus & Dentel 2017). Die in einer Simulationsumgebung entwickelten Regelungen erzielen in Bezug auf die Prognosegenauigkeit zwar gute Ergebnisse, jedoch ist damit nicht unmittelbar ein optimierter Betrieb in der realen Anwendung gewährleistet. Hierfür sind Simulationsmodelle mit hinreichender Genauigkeit bei moderatem Rechenaufwand notwendig. Eine Validierung

der entwickelten Anlagenmodelle ermöglicht zukünftig eine gezieltere Entwicklung weiterer Optimierungs- und Regelungsstrategien.

Der vorliegende Beitrag präsentiert innerhalb einer Systemanalyse die Validierung von zwei Simulationsmodellen anhand von Typtagen. Die Validierung der implementierten Simulationsmodelle wird auf Grundlage von repräsentativen Betriebsituationen unter realitätsnahen Randbedingungen durchgeführt. Als Bewertungsmethodik wird eine Kombination aus computergestützten Systemsimulationen und Hardware-in-the-Loop (HiL) Messungen angewendet. Dabei werden speziell die von Buderus et al. (2018) vorgestellten Anlagenmodelle im Rahmen dieser Arbeit herangezogen und validiert. Die Autoren beschreiben zwei Modelle: ein vereinfachtes Modell, basierend auf einer Leistungsbilanzierung des TES in einem Temperaturnode, und ein detailliertes Anlagenmodell, welches einen Mehrschichtenspeicher und temperaturniveauabhängige Wärmepumpenleistungen berücksichtigt. Beide Ansätze sollen nach dem oben genannten Vorgehen analysiert und miteinander verglichen werden.

METHODIK

HiL-Prüfstand, Sensorik und WP-Regelung

Der verwendete HiL-Prüfstand kombiniert Wärmeerzeugungsanlagen mit thermischen Energiespeichern und den entsprechenden Wärmequellen und -senken zur Emulation gewisser Gebäudeheizlasten, Trinkwarmwasserbedarfe oder Quellenregime. Mit dem Prüfstand ist eine realitätsnahe und dynamische Untersuchung einer Einzelkomponente, aber auch eines gesamten Wärmeerzeugungssystems möglich.

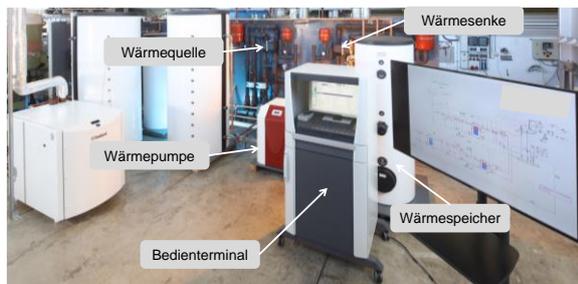


Abbildung 1: HiL-Prüfstand für Wärmepumpen- und BHKW-Systeme an der TH Nürnberg.

In dieser Arbeit wird eine Sole-Wasser-WP (Glen Dimplex, 2020) in Kombination mit einem Heizungspufferspeicher ohne interne Wärmeübertrager eingesetzt. Trinkwarmwasserbedarfe werden vorerst nicht berücksichtigt. Die WP verfügt über eine Norm-Heizleistung (B0/W35) von 10,9 kW, eine elektrische Leistungsaufnahme von 2,2 kW und einen Coefficient of Performance (COP) von 4,9. Der TES fasst ein Volumen von 500 Litern. Der gesamte HiL-Prüfstand ist in Abbildung 1 dargestellt, die entsprechende Hydraulik in Abbildung 2.

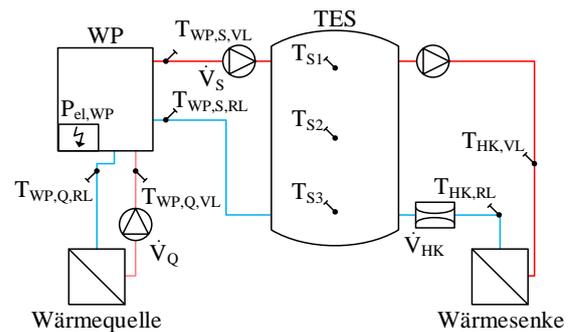


Abbildung 2: Schemazeichnung der Anlagenhydraulik und -sensorik.

Während der experimentellen Messkampagne erfolgt der Betrieb der WP durch deren interne Regelung. Hierbei wurde größtenteils auf die Standardeinstellung des Herstellers zurückgegriffen, jedoch betriebsrelevante Einstellungen geändert, wie einer monoenergetischen Betriebsweise, Festwertregelung der Heizkreisrücklaufumtemperatur auf einen Sollwert von 35 °C und einer Hysterese der Rücklaufsolltemperatur von 2 K. Bei einer Spreizung der WP von ca. 5 K über deren Kondensator, ergeben sich durch die Hystereseerregung heizkreisseitige Austrittstemperaturen $T_{WP,S,VL}$ von maximal 42 °C. Die Eintrittstemperatur $T_{WP,S,RL}$ übersteigt demnach nicht 37 °C. Die Quellaustrittstemperatur $T_{WP,Q,VL}$ beträgt nahezu konstant 10 °C.

Zur energetischen Bilanzierung sind im HiL-Prüfstand Temperatur- und Volumenstromsensoren installiert (siehe Abbildung 2). Damit ist eine thermische Bilanzierung der WP sowohl quellen- als auch senkenseitig möglich. Über einen elektrischen Energiezähler ist die Leistungsaufnahme der WP erfasst. Der TES ist mit drei internen Temperaturfühlern in Tauchhülsen ausgestattet. Die aus dem TES abgeführte Heizleistung wird ebenfalls thermisch bilanziert.

Referenzlastprofile nach VDI 4655

Der HiL-Prüfstand soll während der experimentellen Messkampagne einem realitätsnahen Heizlastprofil unterliegen. Hierzu führt die VDI-Richtlinie 4655 (2019) Referenzlastprofile des Strom-, Heiz-, und Trinkwarmwasserbedarfes auf, welche für die Auslegung, Simulation oder Berechnung von Wärmeerzeugungsanlagen, PV-Anlagen, Wärme- oder Stromspeichern herangezogen werden können. Die Richtlinie unterscheidet dabei zwischen Lastgängen für Einfamilienhäuser (Bestandsgebäude), Niedrigenergiewohnhäuser (Neubau) und Mehrfamilienhäuser im Bestand.

Die Lastprofile der einzelnen Typtage sind zehn Typtagkategorien zugeordnet (siehe Tabelle 1). Deren Bezeichnung setzt sich aus der Jahreszeit (Übergang, Sommer, Winter), dem Wochentag (Werktag, Sonntag) und dem Bewölkungsgrad (Heiter, Bewölkt) entsprechend zusammen. Zur Evaluierung wurden

lediglich die vier Winter-Typtagkategorien (WWH, WWB, WSH und WSB) ausgewählt. Diese zeichnen sich durch hohe und im Tagesverlauf schwankende Heizlasten aus.

Tabelle 1: Typtagkategorien nach VDI 4655.

Jahreszeit	Werktag		Sonntag	
	Heiter	Bewölkt	Heiter	Bewölkt
Übergang	ÜWH	ÜWB	ÜSH	ÜSB
Sommer	SWX		SSX	
Winter	WWH	WWB	WSH	WSB

Aus den in der VDI-Richtlinie hinterlegten normierten Tageslastgängen wird das Referenzlastprofil errechnet. Hierzu ist vorab die Definition eines realitätsnahen Gebäudes nötig, um die spezifische Heizlast der Gebäudefläche anzupassen. Aufgrund der Komponentendimensionierung im HiL-Prüfstand, wurden zwei Doppelhaushälften (Niedrigenergiehaus, Neubau) mit einer gemeinsamen Heizzentrale angenommen. Das fiktive Gebäude befindet sich in der vom Deutschen Wetterdienst definierten Klimazone 13. Die beheizte Wohnfläche beträgt $2 \times 140 \text{ m}^2$ (Durchschnitt nach Statistisches Bundesamt, 2019), der spezifische Heizenergiebedarf $35 \text{ kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ und der Jahresheizenergiebedarf 9800 kWh . Die Wärmeübergabe erfolgt in Niedertemperatur über eine Fußbodenheizung. Die resultierenden Lastprofile sind in Abbildung 3 ersichtlich.

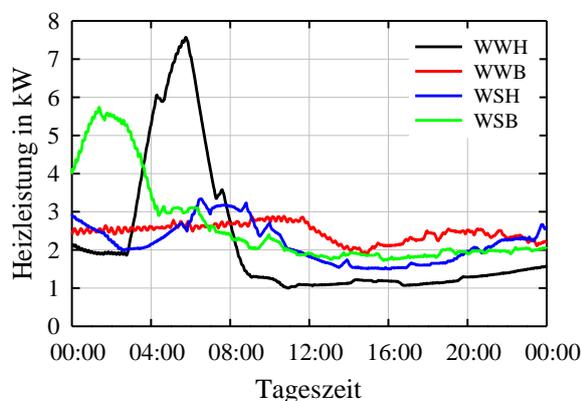


Abbildung 3: Lastprofile der vier ausgewählten Typtagkategorien für Wintermonate.

Modellbeschreibung

Im Rahmen dieser Arbeit wird zwischen zwei grundlegenden Anlagenmodellen unterschieden, welche von Buderus et al. (2018) vorgestellt und im Rahmen ihrer Arbeit zur Optimierung von Wärmepumpensystemen eingesetzt wurden.

Vereinfachtes Modell

Im vereinfachten Modell wird der TES als vollständig durchmischt mit einer Speichertemperatur T_S angesehen, an welchem die zu- und abgeführten Lasten zu

$$C_S \frac{dT_S(t)}{dt} = \dot{Q}_{WP}(t) - \dot{Q}_{Last}(t) - \dot{Q}_{S,Ver}(t) \quad (1)$$

bilanziert werden (vgl. Abbildung 4). Die Speicherkapazitätsrate C_S ergibt sich als Produkt aus dem Speichervolumen $V_S = 500$ Liter, der Dichte $\rho_W = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ und der spezifischen Wärmekapazität $c_{p,W} = 4,18 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (jeweils von Wasser) und beträgt $0,58 \text{ kWh K}^{-1}$.

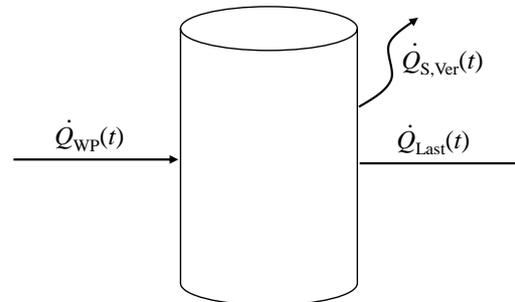


Abbildung 4: Vollständig durchmischter thermischer Speicher als zentrale Anlagenkomponente im vereinfachten Modell.

Die Heizleistung der Wärmepumpe \dot{Q}_{WP} wird anhand des in den Experimenten ermittelten An-Aus-Schaltsignals f_{WP} zu

$$\dot{Q}_{WP}(t) = f_{WP}(t) \cdot \dot{Q}_{WP,max} \quad (2)$$

berechnet, wobei die maximale Heizleistung $\dot{Q}_{WP,max}$ im vereinfachten Modell als konstant angenommen wird. Sie wird nach Herstellerangaben für einen im HiL-Prüfstand typischen mittleren Betriebspunkt (B10/W40) mit $13,9 \text{ kW}$ festgelegt. Die dem TES entzogene Last \dot{Q}_{Last} wird anhand der experimentell ermittelten Entzugslast

$$\dot{Q}_{Last}(t) = c_{p,W} \cdot \dot{V}_{HK} \cdot \rho_W \cdot (T_{HK,VL} - T_{HK,RL}) \quad (3)$$

dem Simulationsmodell als Eingangsgröße vorgegeben. Die Speicherwärmeverluste

$$\dot{Q}_{S,Ver}(t) = (UA)_S \cdot (T_{S,max} - T_a) = const. \quad (4)$$

werden über den gesamten Zeitraum als konstant angenommen. Der Wärmedurchgangskoeffizient beträgt $(UA)_S = 1,72 \text{ W K}^{-1}$ und die Umgebungstemperatur $T_a = 20 \text{ °C}$.

Detailliertes Modell

Die WP wird im detaillierten Modell anhand der Verdampfer- und Kondensatoreintrittstemperaturen ($T_{WP,Q,VL}$ bzw. $T_{WP,S,RL}$) charakterisiert. Somit werden Änderungen im Temperaturniveau im Modell berücksichtigt – die Heizleistung ist dementsprechend variabel. Die thermische und die elektrische Leistung werden auf Grundlage der Herstellerangaben durch ein Polynom errechnet, welches durch zwei Parametersätze bestimmt ist. Genutzt wird hierzu ein Modell

in Anlehnung an das Kompressionswärmepumpenmodell nach Wetter & Afjei (1996).

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{WP} \text{ bzw. } P_{el,WP} = & b_1 + b_2 \cdot T_{WP,Q,VL}^* + \dots \\ & b_3 \cdot T_{WP,S,RL}^* + b_4 \cdot T_{WP,Q,VL}^* \cdot T_{WP,S,RL}^* + \dots \\ & b_5 \cdot T_{WP,Q,VL}^{*2} + b_6 \cdot T_{WP,S,RL}^{*2} \end{aligned} \quad (5)$$

In Gleichung (5) gehen die normalisierten Verdampfer- und Kondensatoreintrittstemperaturen $T_x^* = T_x / 273,15 + 1$ ein. Die Parameter $b_{1...6}$ sind für das hier genutzte Wärmepumpenmodell auf Basis einer multiplen Regression mittels den Herstellerangaben ermittelt worden und in Tabelle 2 aufgetragen.

Tabelle 2: Parameter zur Bestimmung der Heizleistung und elektrischen Leistungsaufnahme.

	Für \dot{Q}_{WP}	Für $P_{el,WP}$
b1	-110,13	34,43
b2	-37,12	3,11
b3	184,55	-75,04
b4	-149,39	6,65
b5	144,61	-5,07
b6	-20,52	36,84

Für den TES wird auf ein Modell von Becker (2006) zurückgegriffen. Der Autor beschreibt einen Mehrschichtenspeicher, bestehend aus N Speicherschichten mit einem Schichtvolumen von je $V_i = V_S / N$ (für $i = 1 \dots N$). Für den in dieser Arbeit simulierten TES wurde $N = 3$ Schichten vorausgesetzt, zumal im realen TES entsprechend drei Temperatursensoren installiert sind. Das Modell berücksichtigt unter anderem auch interne Wärmeströme zwischen den Speicherschichten sowie Wärmeverluste an die Umgebung (siehe Abbildung. 5). Die Be- und Entladewärmeströme werden stets in die oberste bzw. die unterste Speicherschicht eingebracht.

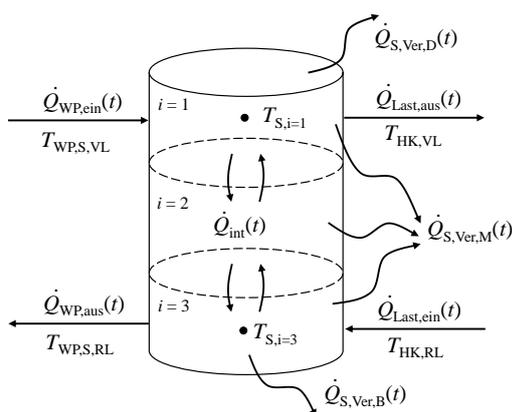


Abbildung 5: Mehrschichtenspeicher als zentrale Anlagenkomponente im detaillierten Modell.

Die Heizleistung der Wärmepumpe $\dot{Q}_{WP,ein}$ wird erneut anhand des An-Aus-Schaltsignals f_{WP} zu

$$\dot{Q}_{WP,ein}(t) = f_{WP}(t) \cdot \dot{Q}_{WP}(T_{WP,Q,VL}, T_{WP,S,RL}) \quad (10)$$

berechnet, wobei die Heizleistung \dot{Q}_{WP} mit dem Polynom nach Gleichung (5) ermittelt wurde. Die dem TES entzogene Last $\dot{Q}_{Last,aus}$ entspricht der experimentell ermittelten Entzugslast nach Gleichung (3). Die Speicherwärmeverluste der Mantelfläche $\dot{Q}_{S,Ver,M}$, des Speicherbodens $\dot{Q}_{S,Ver,B}$ und des Speicherdeckels $\dot{Q}_{S,Ver,D}$ werden in Anlehnung an Gleichung (4) mit ihrer spezifischen Fläche und Schichttemperatur $T_{S,i}$ errechnet. Der interne Wärmeaustausch zwischen den Schichten \dot{Q}_{int} berechnet sich zu

$$\dot{Q}_{int,i}(t) = V_S \cdot \frac{\lambda_S}{H_S^2} \cdot N \cdot (T_{S,i+1} - T_{S,i}), \quad (7)$$

mit einer Speicherhöhe $H_S = 2$ m. Bei den internen Wärmeströmen werden sowohl konvektive als auch konduktive Wärmeströme in der Speicherwand berücksichtigt, sodass sich eine effektive Wärmeleitfähigkeit $\lambda_S = 1,57 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ergibt. Sodann kann für jede Speicherschicht $i = 1 \dots N$, unter Berücksichtigung der tatsächlich in der jeweiligen Schicht auftretenden Wärmeströme, die Leistungsbilanz zu

$$\frac{C_S}{N} \frac{dT_{S,i}(t)}{dt} = \dot{Q}_{WP,i}(t) - \dot{Q}_{Last,i}(t) + \dots + \dot{Q}_{int,i}(t) - \dot{Q}_{S,Ver,i}(t) \quad (8)$$

aufgestellt und die entsprechende Speicherschichttemperatur $T_{S,i}$ errechnet werden.

Weitere Systemgrößen

Als weiteres Bewertungskriterium wird der Ladezustand des TES, der sogenannte State of Charge (SoC), berechnet. Dieser ist definiert zu

$$SoC(t) = \frac{Q_S(t)}{Q_{S,max}} = \frac{\overline{T_S}(t) - T_{S,min}}{T_{S,max} - T_{S,min}} \quad (9)$$

als der Quotient aus der aktuellen $Q_S(t)$ und der maximal möglichen gespeicherten Wärmeenergie des TES $Q_{S,max}$. Unter der Annahme temperaturunabhängiger Fluidparameter kann der SoC als Quotient aus zwei Temperaturdifferenzen dargestellt werden. Hierbei ist $\overline{T_S}(t)$ die mittlere Speichertemperatur sowie $T_{S,max} = 45 \text{ °C}$ und $T_{S,min} = 25 \text{ °C}$ die obere und untere Speichergrenztemperatur. Die maximal mögliche Speicherkapazität $Q_{S,max}$ beträgt rund 11,6 kWh.

Bewertungsmetrik

Zum Vergleich zwischen den simulierten Systemgrößen $S_{x,i}$ und den gemessenen Größen $G_{x,i}$ stellt die einfache Fehlerdistanz $e_{x,i}$ mit

$$e_{x,i} = S_{x,i} - G_{x,i}, \quad (10)$$

$i = 1, 2, \dots, n$ (n ist die Anzahl an Messpunkten bzw. Simulationszeitschritten) und x als Bezeichnung der Systemgröße für viele statistische Metriken die Grundlage für ihre Berechnung dar. In dieser Arbeit wird zur Bewertung der Systemgrößen der absolute Fehler $|e_{x,i}|$, als Betrag der einfachen Fehlerdistanz, und die Root-Mean-Square Error (RMSE) Metrik genutzt, welche zu

$$RMSE_x = \left[n^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n e_{x,i}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

definiert ist.

SYSTEMBEWERTUNG

Zur funktionalen Systemanalyse werden die Soll-Ist-Werte des Heizenergiebedarfes miteinander bilanziert, um die Funktionalität aller Anlagenkomponenten im Prüfstand unter dynamischen Betriebsverhältnissen zu bestätigen. Beispielhaft sind hierzu in Abbildung 6 für den Typtag WWB und WWH die gemessene Heizleistung der Soll-Heizleistung (Referenzlastprofil) im Tagesverlauf gegenübergestellt.

Das Referenzlastprofil des Typtags WWB zeichnet sich durch einen wenig dynamischen Lastverlauf mit Heizlasten von 1,9 ... 2,9 kW aus. Der Soll-Heizenergiebedarf über die Messdauer (24 Stunden) beträgt 59,2 kWh, welchen das System zu 99,8 % decken kann. Im zeitlichen Verlauf können zwischen der Soll- und Ist-Heizlast ein absoluter Fehler von maximal 148 W ermittelt werden. Der $RMSE_{Q,Last,WWB}$ ergibt sich zu 23 W.

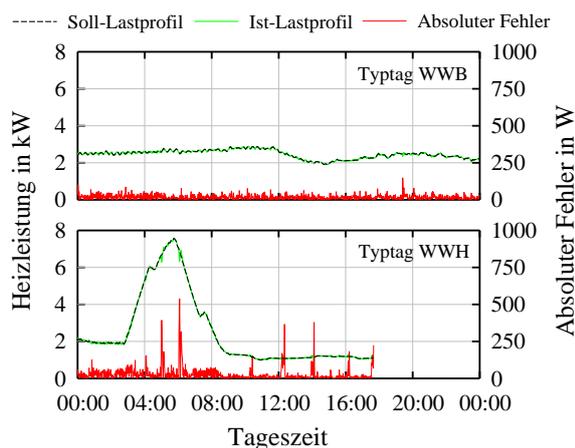


Abbildung 6: Soll- und Ist-Heizlastprofil der Typtage WWH und WWB sowie der absolute Fehler.

Das Referenzlastprofil des Typtags WWH ist dynamischer mit einer Heizlastspitze von bis zu 7,6 kW. Der Soll-Heizenergiebedarf über die Messdauer (ca. 18 Stunden) beträgt 43,8 kWh. Das System stellt

43,7 kWh zur Verfügung. Der absolute Fehler beträgt höchstens 538 W und der $RMSE_{Q,Last,WWH}$ 56 W. Für die beiden weiteren gemessenen Typtage werden vergleichbare Ergebnisse erzielt.

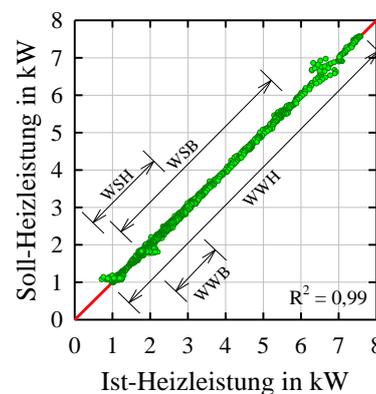


Abbildung 7: Streudiagramm der Soll- und Ist-Heizlast aller vier Referenztyptage.

Generell kann zwischen den Soll- und Ist-Heizlasten eine hohe Korrelation festgestellt werden. In Abbildung 7 sind die beiden Heizlasten aller vier Typtage graphisch in einem Streudiagramm gegenübergestellt. Sie weisen ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,99$ und einen $RMSE$ von 40,6 W auf.

Der Heizbedarf der vorgegebenen Lastprofile kann zu jeder Zeit von der WP erbracht werden. Die Funktionalität der Systemkomponenten im HiL-Prüfstand kann unter dynamischen Heizbedarfsprofilen bestätigt werden.

MODELLVALIDIERUNG

Für die eigentliche Modellvalidierung werden die in der Messkampagne ermittelten den simulierten Systemgrößen aus dem vereinfachten und dem detaillierten Modell entsprechend gegenübergestellt und bewertet. Dies sind unter anderem der Speicherladezustand SoC , die mittlere Speichertemperatur \bar{T}_S , die Heizleistung \dot{Q}_{WP} , die elektrische Leistungsaufnahme $P_{el,WP}$ sowie die Leistungszahl $COP = \dot{Q}_{WP} / P_{el,WP}$.

In Abbildung 8 ist der gemessene den beiden simulierten SoC für alle vier Referenztyptage im Tagesverlauf gegenübergestellt. Der simulierte SoC des detaillierten Modells weist qualitativ eine hohe Übereinstimmung mit der Messung auf. Betrachtet man die gesamte simulierte Zeitspanne, können absolute Fehler in Höhe von 5,0 Prozentpunkten (WSH) bis 7,2 %-Pkt. (WSB) ermittelt werden. Es ergeben sich $RMSE_{SoC}$ Werte von 1,7 %-Pkt. (WWB) bis höchstens 3,8 %-Pkt. (WSB). Dies entspricht einer Abweichung der gespeicherten Wärmeenergie des TES von 0,6...0,8 kWh. Der SoC -Verlauf des vereinfachten Modells folgt qualitativ den Messergebnissen, weist aber eine deutliche Drift zu höheren Speicherladezuständen auf. In den Anfangsphasen der Profile WWH und WSB treten relativ lange Betriebszustände der WP auf. Der absolute Feh

ler ist vier Stunden nach Messstart deutlich kleiner 10 %-Pkt., steigt dann aber auch bei diesen beiden Typtagen stark an. Die absoluten Fehler kumulieren sich auf 43...69 Prozentpunkte.

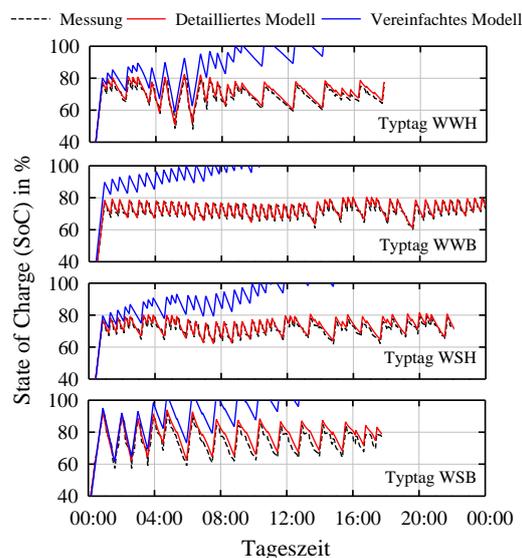


Abbildung 8: Gemessener und simulierter Speicherladezustand SoC aller vier Typtage.

Der in Abbildung 8 dargestellte Verlauf des SoC ist qualitativ mit der mittleren Speichertemperatur \bar{T}_S gleichzusetzen (vgl. Gleichung (9)), wobei ein SoC von 100 % $\bar{T}_S = T_{S,max} = 45^\circ\text{C}$ impliziert. Dementsprechend ergeben sich mit dem detaillierten Modell absolute Fehler von höchstens $1,4^\circ\text{C}$. Der $RMSE_{T,S}$ beträgt für den gesamten Zeitraum zwischen $0,3...0,8^\circ\text{C}$. Die bereits erwähnten deutlich größeren Abweichungen zum vereinfachten Modell im SoC, spiegeln sich auch in der mittleren Speichertemperatur wieder. Diese weicht absolut um bis zu $13,7^\circ\text{C}$ vom Messergebnis ab.

Zur Bewertung des Wärmepumpenmodells sind in Abbildung 9 die Heizleistungen der ersten 6 Stunden eines jeden Typtages graphisch dargestellt. Deutlich erkennbar sind die beiden unterschiedlichen Modellansätze zur Berechnung der Wärmepumpenheizleistung: eine konstante Leistung im vereinfachten Modell (vgl. Gleichung (2)) und eine temperaturniveauabhängige Leistung im detaillierten Modell (vgl. Gleichung (5)). Die Heizleistung der WP steigt im Realbetrieb in den ersten Betriebsminuten sukzessive an. In beiden Modellen steht die Heizleistung aber bereits von Beginn an vollständig zur Verfügung, weshalb vor allem beim Anfahrvorgang starke Abweichungen zu erkennen sind. Der absolute Fehler beläuft sich auf bis zu $11,5\text{ kW}$ in beiden Modellen. Es wird ein $RMSE_{Q,WP}$ von rund $3,7\text{ kW}$ ermittelt. Betrachtet man lediglich den quasi-stationären Wärmepumpenbetrieb und vernachlässigt den Anfahrvorgang in den ersten Minuten nach dem Start der WP, so können absolute Fehler deutlich kleiner $2,0\text{ kW}$ und ein $RMSE_{Q,WP}$ von bis zu $2,0\text{ kW}$ genannt werden.

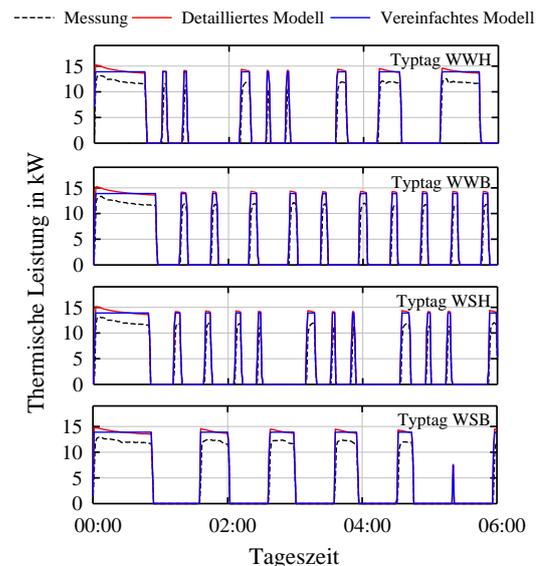


Abbildung 9: Gemessene und simulierte Wärmepumpenheizleistung aller vier Typtage.

Die gleichen Modellannahmen treffen auch bei der elektrischen Leistung der WP zu. Da diese aber auch im Realbetrieb sofort vom Stromnetz bezogen wird (ohne Anfahrereffekte), fallen die absoluten Fehler mit höchstens $0,3\text{ kW}$ für das vereinfachte und $0,5\text{ kW}$ für das detaillierte Modell deutlich moderater aus. Der $RMSE_{P,el,WP}$ liegt bei höchstens $0,2\text{ kW}$.

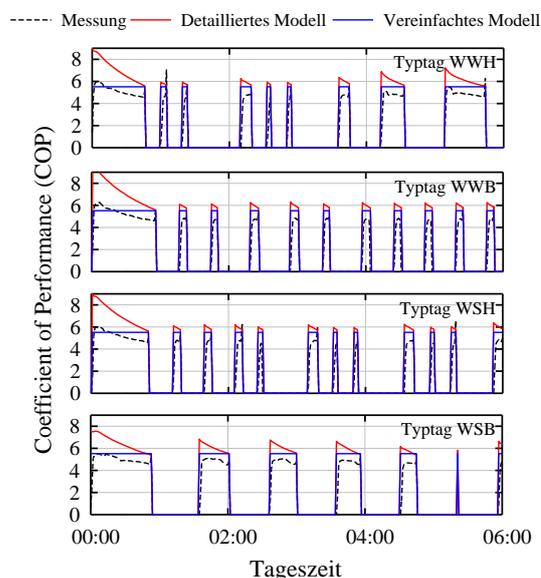


Abbildung 10: Gemessene und simulierte Leistungszahl COP aller vier Typtage.

Aufgrund der Berechnung des COP als Quotient aus Heizleistung und elektrischer Leistungsaufnahme der WP, sind dessen Modellierungsungenauigkeiten vergleichbar mit denen der thermischen Leistung. So treten auch hier starke Abweichungen hauptsächlich in den ersten Minuten nach Start der WP auf (siehe Abbildung 10). Im Vergleich zu den Messungen werden im detaillierten Modell absolute Fehler von $6,6...7,0$

und ein $RMSE_{COP}$ von 2,4...2,8 berechnet. Auch hier würden sich der absolute Fehler auf kleiner 2,0 und $RMSE_{COP}$ auf 1,0...1,2 belaufen, sofern die ersten Minuten nach Start der WP (Anfahrvorgang) nicht in der Auswertung berücksichtigt werden.

Funktionalität des vereinfachten Modells

Grundsätzlich stellt sich nach oben präsentierten Ergebnissen die Frage nach der allgemeinen Funktionalität des vereinfachten Modells und dessen Modelltreue, trotz teils hoher Ungenauigkeiten. Hierzu wurde eine erneute Anlagensimulation durchgeführt, bei welcher die tatsächlich gemessene Wärmepumpenheizleistung als Modellinput in Anlehnung an Gleichung (2) zu

$$\dot{Q}_{WP}(t) = f_{WP}(t) \cdot \dot{Q}_{WP,mess}(t) \cdot PF \quad (11)$$

mit dem Korrekturfaktor $PF = 1,154$ eingeht. Der sich hieraus ergebende SoC ist graphisch für alle vier Typtage in Abbildung 11 dargestellt. Mit der Anpassung der Randbedingungen werden absolute Fehler in Höhe von 10,9...23,0 %-Pkt. festgestellt. Die $RMSE_{SoC}$ Metrik verringert sich auf Werte zwischen 2,8 und 8,4 Prozentpunkte.

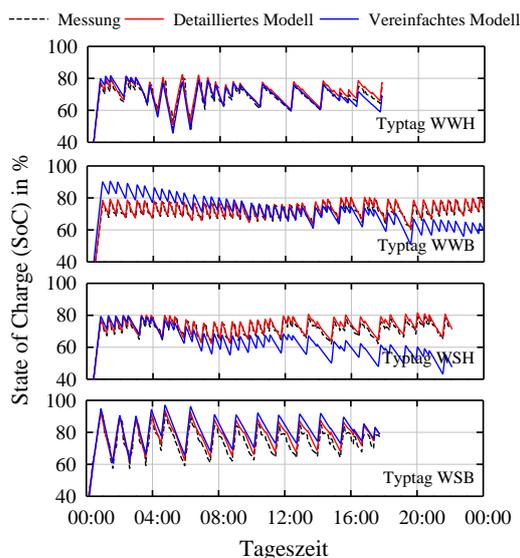


Abbildung 11: Gemessener und simulierter Speicherladezustand SoC mit abweichenden Randbedingungen im vereinfachten Modell.

ZUSAMMENFASSUNG

Zur Validierung von zwei Simulationsmodellen, welche sich in ihrem Modellierungsgrad unterscheiden, wurden repräsentative Typtage nach VDI 4655 herangezogen. Auf Grundlage dieser Referenzlastprofile wurden Messungen an einem Hardware-in-the-Loop Wärmepumpenprüfstand in repräsentativen Betriebsituationen unter realitätsnahen Randbedingungen durchgeführt.

Das detaillierte Modell weist generell eine hohe Modelltreue gegenüber den gemessenen Systemgrößen auf. So können beispielsweise absolute Fehler im Speicherladezustand (SoC) von höchstens 7,2 Prozentpunkten und $RMSE_{SoC}$ Werte von maximal 3,8 Prozentpunkten ermittelt werden, was einer Abweichung der gespeicherten Wärmeenergie des TES von 0,8 kWh entspricht. Ebenso weicht die simulierte mittlere Speichertemperatur deutlich weniger als $1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ von den gemessenen Werten ab.

Im vereinfachten Modell zeigen die Simulationen, dass unter der Annahme einer konstanten Heizleistung nach Herstellerangaben (für einen im Prüfstand typischen Betriebspunkt) die gemessene Heizleistung überschätzt wird. Hauptsächlich bei relativ kurzen Betriebsintervallen der WP führt dies zu einem übermäßig hohen Energieeintrag in den TES, da sich im Realbetrieb die Heizleistung sukzessive bis auf einen quasi-stationären Wert erhöht. Diese Anfahreffekte sind auf thermische Trägheiten des Systems zurückzuführen und werden vom Modell bisher nicht berücksichtigt. Das Modell stellt die Ausgangsleistung also sofort und vollständig zur Verfügung. Über den Tag hinweg kumulieren sich diese Abweichungen und führen zu einem rapiden und unrealistischen Anstieg der Speichermitteltemperatur. So weicht diese um bis zu $13,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ von der Messung ab. Ebenso können absolute Fehler im SoC von 43...69 Prozentpunkten ermittelt werden. In einer zusätzlichen Anlagensimulation mit dem vereinfachten Modell wurde die tatsächlich gemessene Wärmepumpenheizleistung als Modellvorgabe herangezogen. Unter der getroffenen Annahme wird die gemessene Heizleistung zusätzlich mit einem Korrekturfaktor $PF = 1.154$ multipliziert, welcher anhand von empirischen Vergleichsrechnungen zwischen der stationär-gemessenen Heizleistung und der Herstellerangabe bestimmt wurde. Dies kann auf Messfehler am Prüfstand aber auch auf abweichende Herstellerangaben zurückzuführen sein.

Es wird geschlussfolgert, dass das vereinfachte Modell die Anlagenkomponenten physikalisch korrekt abbilden kann, jedoch der Bezug auf Herstellerangaben bzw. die Annahme konstanter Heizleistungen zu erheblichen Modellungenauigkeiten führen. Durch reale Messwerte aus Leistungsmessungen, welche im Prüfstand auf einem typischen Temperaturniveau des Realbetriebes ermittelt wurden, kann eine signifikant höhere Modelltreue erreicht werden. Das detaillierte Modell zeigt grundsätzlich, durch seine physikalisch exaktere Abbildung der Anlagenkomponenten, höhere Genauigkeit zu den Messungen. Der Einsatz des detaillierten Modells ist aufgrund seiner Modelltiefe grundsätzlich zu bevorzugen. Jedoch muss je nach Anwendungsfall, zum Beispiel aus Performancegründen, für eine zukünftige Entwicklung intelligenter bzw. prädiktiver Regelungsalgorithmen auch auf einfachere Modelle zurückgegriffen werden.

DANKSAGUNG

Das dieser Veröffentlichung zugrunde liegende Projekt „InnoProSys - Technologietransfer innovativer Produkte und Systeme in der Energie- und Gebäudetechnik“ wird aus Mitteln des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) gefördert.

Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt ausschließlich bei den Autoren.

LITERATUR

- Arteconi, A., Hewitt, N. J., Polonara, F., 2013. Domestic demand-side management (DSM): Role of heat pumps and thermal energy storage (TES) systems. *Applied Thermal Engineering* 51 (1-2), S. 155 – 165.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.09.023>
- Battaglia, M., Haberl, R., Bamberger, E., Haller, M., 2017. Increased self-consumption and grid flexibility of PV and heat pump systems with thermal and electrical storage. *Energy Procedia* 135, S. 358 - 366.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.527>
- Becker, R., 2006. Optimierung thermischer Systeme in dezentralen Energieversorgungsanlagen. Dissertation, Technische Universität Dortmund.
- Buderus, J., Dentel, A., Stephan, W., 2016. Model predictive control for air conditioning systems in production sites. 12th REHVA World Congress CLIMA 2016, Aalborg, Denmark.
- Buderus, J., Dentel, A., 2017. Generalization Approach for Models of Thermal Buffer Storages in Predictive Control Strategies. 15th International Conference of IBPSA - Building Simulation, San Francisco, USA.
- Buderus, J., Betzold, C., Kandasamy, K., Dentel, A., 2018. Gegenüberstellung zweier Modellbasierter Optimierungen für den Wärmepumpenbetrieb. Tagungsband BauSIM 2018, S. 415 – 422, Karlsruhe. <https://doi.org/10.5445/IR/1000085743>
- Dentel, A., Betzold, C., Stephan, W., 2019. Smart Operation Strategies for Heat Pumps in Dwellings. The 16th International Conference of IBPSA - Building Simulation 2019, Rome, Italy.
- Felten, B., Weber, C., 2017. Modeling the Value of Flexible Heat Pumps. HEMF Working Paper No. 09/2017, Universität Duisburg / Essen.
- Finck, C., Li, R., Zeiler, W., 2017. Operation of heat pumps for smart grid integrated buildings with thermal energy storage. 12th IEA Heat Pump Conference, Rotterdam.
- Fischer, D., Rivera, T., Lindberg, K. B., Wille-Haussmann, B., Madani, H., 2014. Investigation of Thermal Storage Operation Strategies with Heat Pumps in German Multi Family Houses. *Energy Procedia* 58, S. 137 – 144.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.420>
- Glen Dimplex. 2020. Datenblatt SI 11TU. Online: <http://www.dimplex.de/pdf/de/SI11TU.pdf>. (abgerufen am 10.03.2020).
- Halvgaard, R., Poulsen, N. K., Madsen, H., Jørgensen, J. B., 2012. Economic Model Predictive Control for Building Climate Control in a Smart Grid. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), Washington, DC, USA.
<https://doi.org/10.1109/ISGT.2012.6175631>
- Heinrich-Böll-Stiftung, Green European Foundation, European Renewable Energies Federation, Le Monde diplomatique, 2018. *Energieatlas 2018*, Berlin.
- Psimopoulos, E., Leppin, L., Luthander, R., Bales, C., 2016. Control algorithms for PV and Heat Pump system using thermal and electrical storage. ISES EuroSun 2016, Palma de Mallorca, Spanien.
<https://doi.org/10.18086/eurosun.2016.08.13>
- Statistisches Bundesamt, 2019. *Wirtschaftsrechnungen: Einkommens- und Verbrauchsstichprobe Wohnungsverhältnisse privater Haushalte. Fachserie 15, Sonderheft 1, EVS 2018*, Berlin.
- VDI 4655, 2019. Referenzlastprofile von Wohngebäuden für Strom, Heizung und Trinkwarmwasser sowie Referenzerzeugungsprofile für Fotovoltaikanlagen. VDI-Richtlinie 4655, Blatt 1, Beuth Verlag, Berlin.
- Verhelst, C., 2012. Model predictive control of ground coupled heat pump systems for office buildings. Dissertation, Katholieke Universiteit Leuven.
- Wetter, M., Afjei, Th., 1996. TRNSYS TYPE 401 Kompressionswärmepumpe inklusiv Frost- und Taktverluste, Zentralschweizerisches Technikum Luzern, Schweiz.

ANWENDUNG VON METHODEN DES MASCHINELLEN LERNENS ZUR GANZHEITLICHEN RAUMREGELUNG

S. Kalmbach¹, W. Haase¹ und W. Sobek^{1,2}

¹Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren,
Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

²Werner Sobek AG, Stuttgart, Deutschland

KURZFASSUNG

In diesem Beitrag wird eine von den Autoren erstellte, sich selbst konditionierende Raumregelung vorgestellt, die Methoden aus dem Bereich des maschinellen Lernens anwendet.

Das sogenannte bestärkende Lernen wurde mit Simulationen zum Raumklima und der Beleuchtung für einen Testraum verknüpft mit dem Ziel, eine künstliche neuronale Netzstruktur zu trainieren.

In einer Simulation konnte gezeigt werden, dass es mit Methoden des bestärkenden Lernens möglich ist, ein künstliches neuronales Netz so zu trainieren, dass die Regelung einer adaptiven Verglasung, der künstlichen Beleuchtung sowie der Heizung und Kühlung mit guter Effizienz ausgeführt werden kann.

ABSTRACT

This paper presents a self-conditioning room control system created by the authors, which uses methods from the field of machine learning.

The so-called reinforcement learning was combined with simulations of indoor climate and lighting for a test room with the aim of training an artificial neural network structure.

In a simulation it could be shown that it is possible to train an artificial neural network with methods of reinforcement learning in a way that the control of adaptive glazing, artificial lighting, heating and cooling can be performed with good efficiency.

EINFÜHRUNG

Die Anforderungen an Raum- und Gebäuderegulungen sind vielfältig. Zum einen muss auf einen sparsamen Umgang mit der zur Konditionierung eingesetzten Energie geachtet werden, um Ressourcen zu schonen und Betriebskosten zu senken, zum anderen soll die Behaglichkeit für die Nutzer sichergestellt werden.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sind ganzheitliche Konzepte der Gebäuderegulung, welche möglichst viele Einflussparameter berücksichtigen, erforderlich.

Der von den Autoren untersuchte Ansatz zur Lösung dieser Aufgabe basiert auf der Anwendung von Methoden des bestärkenden Lernens zur Regulierung der Innenraumtemperatur, zur Ansteuerung der Innenraumbeleuchtung sowie zum Dimmen einer adaptiven Verglasung, deren Transmissionsgrad einstellbar ist.

Umgesetzt wurde die Regelung in Form einer realitätsnahen und instationären Simulation mit Kopplung von Gebäudeklima- und Tageslichtberechnungen. Simuliert wurde ein räumliches Gebäudemodell, welches sich in Geometrie und Topologie an einem Fassadentestgebäude, welches vom Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK) der Universität Stuttgart betrieben wird, orientiert.

Abbildung 1 zeigt die am gesamten Testgebäude sowie die für den Testraum verfügbare Sensorik des Fassadentestgebäudes. Die mit Bezeichnungen gekennzeichneten Messpunkte wurden in die Simulation und Regelung mit aufgenommen.

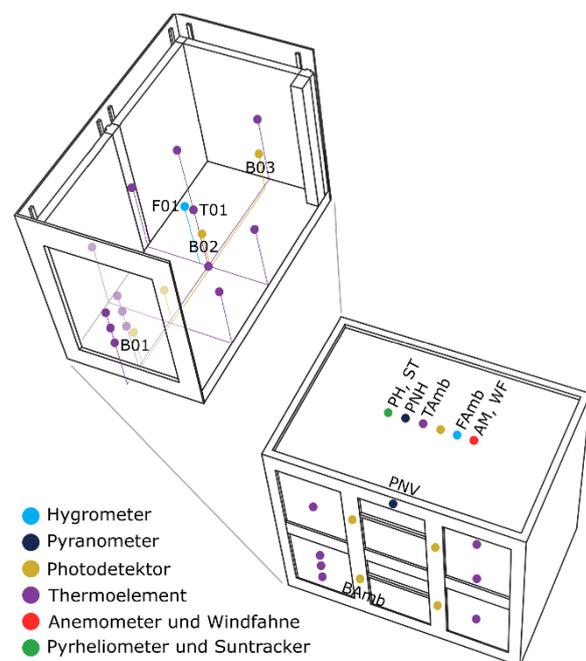


Abbildung 1: Sensorübersicht des Referenzraumes
(Haase u. Husser 2018)

Die zu entwickelnde Regelung sollte in der Lage sein, kontinuierlich, unter Einbeziehung von Informationen der Sensorik und anhand von beleuchtungstechnischen und thermischen Kriterien ihre Regelungszustände der technischen Gebäudeausstattung anpassen und optimieren zu können.

Als beleuchtungstechnisches Kriterium ist eine Beleuchtungsstärke von 500 lx auf Grundlage der DIN EN 12464-1 einzuhalten. Die thermischen Randbedingungen beziehen sich auf einen einzuhaltenen Temperaturbereich im Innenraum, welcher von 20 °C bis 26 °C nach DIN EN 12831-1 definiert ist.

Der Regelung stehen zur Konditionierung des Innenraums die in Abbildung 2 dargestellten Komponenten zur Verfügung. Dies sind an den Innenwänden angebrachte Kapillarrohrmatten zur flächigen Heizung und Kühlung, drei dimmbare Beleuchtungsmittel, welche zur Ansteuerung in zwei Gruppen eingeteilt sind, sowie eine in der Licht- und Energiedurchlässigkeit regelbare Verglasung auf Flüssigkristallbasis.

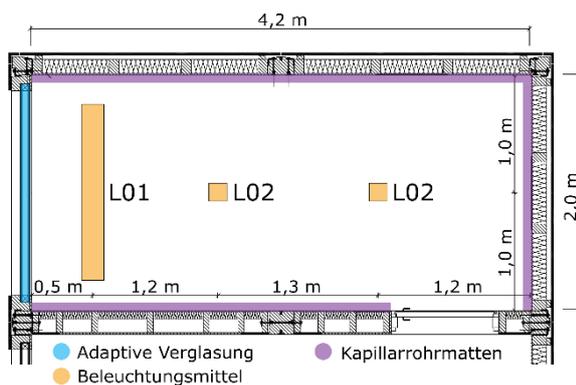


Abbildung 2: Übersicht der regelbaren technischen Ausstattung des Referenzraumes

KÜNSTLICHE NEURONALE NETZSTRUKTUR

In dem Bestreben, das Verhalten von Neuronen und ihr Zusammenspiel in Nervensystemen nachzubilden, repräsentieren künstliche neuronale Netze eine vereinfachte, in mathematische Funktionen überführte Analogie eines biologischen Systems (Ertel 2016).

Diese Netze sind in der Lage, Eingabedaten (Informationen) zu verarbeiten und daraus Ausgabedaten zu liefern. Eingabedaten im Sinne der Regelungsaufgabe sind beispielsweise die Innenraumtemperatur oder die relative Umgebungsluftfeuchtigkeit. Ausgabedaten hingegen sind Einstellungen wie der Schaltzustand der adaptiven Verglasung zur Regelung der Transmission.

Eine Vernetzung von mehreren künstlichen Neuronen bildet ein künstliches neuronales Netz. Diese

Vernetzungen können unterschiedlichste Ausprägungen haben.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde ein mehrschichtiges feedforward-Netz verwendet. Bei diesem ist jedes Neuron aus einer Schicht mit allen Neuronen der nächsten sowie der vorangegangenen Schicht verbunden. Um eine Ausgabe aus einer gegebenen Eingabe zu erhalten, werden die Informationen von Schicht zu Schicht weitergegeben. Jeder Eingabewert eines Neurons ist dabei mit einer Gewichtung (engl. Weight) versehen, jedem Neuron wird ein Schwellwert (engl. Bias) addiert. Die Summe dieser Terme bildet die Eingabe einer Funktion, welche als Aktivierungsfunktion bezeichnet wird. Die Ausgabe eines Neurons ist somit das Ergebnis seiner Aktivierungsfunktion (Frochte 2019).

In Abbildung 3 sind die Abhängigkeiten eines einzelnen künstlichen Neurons von dessen Eingabewerten, der Gewichte sowie der Aktivierungsfunktion dargestellt.

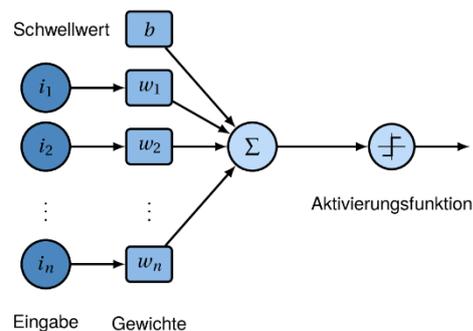


Abbildung 3: Mathematisches Modell eines künstlichen Neurons (Frochte 2019)

Ein mehrschichtiges Netz ist gegeben, sobald das neuronale Netz mehr als eine verborgene Neuronenschicht (engl. Hidden Layer) besitzt (Dutta 2018).

Die vorgestellte Regelung verwendet eine Netzstruktur mit 25 Eingangswerten (siehe Tabelle 1), zwei verborgenen Neuronenschichten mit jeweils 64 Neuronen sowie zehn Ausgabewerten, mit welchen fünf Regelzustände ermittelt werden. Abbildung 4 zeigt den schematischen Aufbau der Netzstruktur.

Die in Tabelle dargestellten Regelzustände werden anhand einer Wahrscheinlichkeitsverteilung, der Gaußschen Normalverteilung, ermittelt. Für jeden Regelzustand repräsentieren zwei Ausgabewerte des neuronalen Netzes die Standardabweichung und den Erwartungswert der Normalverteilung. Dies ermöglicht die Ausgabe von kontinuierlichen Werten, welche zur Definition der Regelzustände herangezogen werden (Sutton u. Barto 2018).

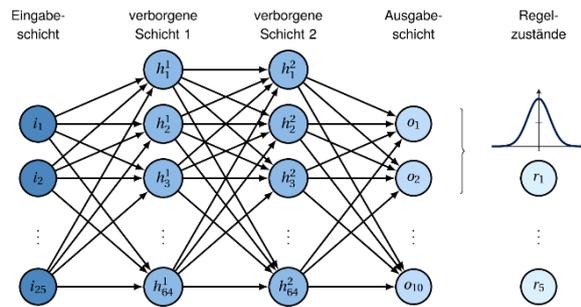


Abbildung 4: Schematischer Aufbau des untersuchten neuronalen Netzes

Als Eingabewerte werden dem künstlichen neuronalen Netz die in Tabelle 1 aufgelisteten Parameter übermittelt.

Tabelle 1: Eingabeparameter des künstlichen neuronalen Netzes

Bezeichnung	Einheit
Windgeschwindigkeit (AM)	m/s
Windrichtung (WF)	°
Beleuchtungsstärke auf horizontalen Messpunkt BAm	lx
Beleuchtungsstärke auf horizontalen Messpunkt B01	lx
Beleuchtungsstärke auf horizontalen Messpunkt B02	lx
Beleuchtungsstärke auf horizontalen Messpunkt B03	lx
Relative Umgebungsluftfeuchtigkeit außen (Famb)	%
Schwellwert der Temperatur zum Aktivieren der Heizung	°C
Schwellwert der Temperatur zum Aktivieren der Kühlung	°C
Schaltzustand der Leuchtmittelgruppe L01	-
Schaltzustand der Leuchtmittelgruppe L02	-
Unterer Sollwert der Beleuchtungsstärke	lx
Direktstrahlung auf das Pyrheliometer (PH)	W/m ²
Globalstrahlung auf horizontales Pyranometer (PNH)	W/m ²
Globalstrahlung auf vertikales Pyranometer (PNV)	W/m ²
Anwesenheit von Personen	-
Tag des aktuellen Jahres als Dezimalzahl	d
Stunde des aktuellen Tages	h
Kühlenergiebedarf	kJ/h
Heizenergiebedarf	kJ/h
Energiebedarf der Beleuchtung	kW
Relative Innenraumluftfeuchtigkeit (F01)	%
Verschattungszustand der adaptiven Verglasung	-
Innenraumlufttemperatur (T01)	°C
Umgebungslufttemperatur außen (Tamb)	°C

Tabelle 2 stellt die durch das neuronale Netz ermittelten Regelzustände zur Steuerung der technischen Ausstattung dar.

Tabelle 2: Parameter zur Regelung der technischen Ausstattung

Bezeichnung	Einheit
Schwellwert der Temperatur zum Aktivieren der Heizung	°C
Schwellwert der Temperatur zum Aktivieren der Kühlung	°C
Schaltzustand der adaptiven Verglasung	-
Schaltzustand der Leuchtmittelgruppe L01	-
Schaltzustand der Leuchtmittelgruppe L02	-

Die Anwendung von Methoden des maschinellen Lernens lässt sich in drei Bereiche unterteilen. Diese sind das überwachte Lernen (Anwendung z.B. bei Klassifizierungsaufgaben und der Regressionsanalyse), das unüberwachte Lernen

(Anwendung z.B. bei der Mustererkennung und der Bildsegmentierung) sowie das bestärkende Lernen (Dutta 2018).

BESTÄRKENDES LERNEN

Bestärkendes Lernen (engl. Reinforcement Learning), beschreibt eine Klasse von Methoden, bei denen Programme, welche als Agenten bezeichnet werden, mit einer bekannten oder unbekanntem Umgebung in Interaktion treten. Aktionen des Agenten, welche innerhalb der Umgebung als erfolgreich einzuordnen sind, werden durch Belohnungen (engl. Rewards) honoriert. Das Ziel des Agenten ist es, die Belohnungen durch Anpassungen der Aktionen zu maximieren (Sutton u. Barto 2018).

Die zur Anwendung kommenden Theorien entstammen unter anderem dem Darwinismus, den Neurowissenschaften oder der Verhaltenspsychologie (Dutta 2018).

Am Beispiel der Simulation des Fassadentestgebäudes zeigt Abbildung 5 den grundlegenden Aufbau bei der Anwendung von bestärkendem Lernen. Die Simulation repräsentiert das Umfeld, mit welchem der Agent interagiert. Die in Tabelle 1 dargestellten Eingabeparameter, welche unter anderem aus der Simulation zum Innenraumklima und zu den Beleuchtungsstärken stammen, liefern dem Agenten die Informationen über die Umwelt. Die Umwelt besitzt hierbei eine Menge von Zuständen S . Auf der Grundlage dieser Zustände kann der Agent abhängig vom Status $s_t \in S$ eine Aktion (Regelzustand) $a_t \in A(s_t)$ für die Komponenten Heizung, Kühlung, Beleuchtung und Verschattung aus den verfügbaren Aktionen auswählen. Dies führt zu einem Folgezustand $s_{t+1} \in S$, in welchem er anhand einer Bewertung des erzeugten Zustandes eine Belohnung $r_{t+1} \in R$ erhält (Frochte 2019).

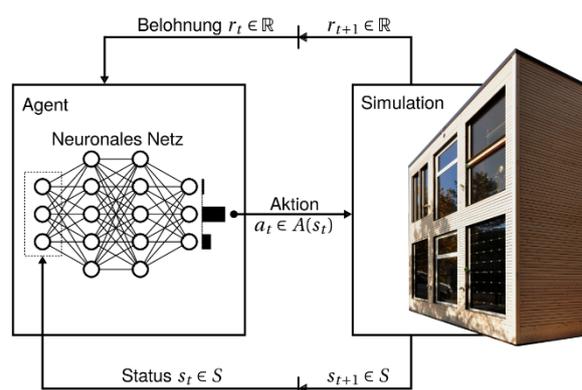


Abbildung 5: Grundlegende Architektur des bestärkenden Lernens

Aus den zur Verfügung stehenden Methoden des bestärkenden Lernens findet der Proximal Policy Optimization (PPO) Algorithmus Anwendung in der

Regelung. Dieser zeichnet sich durch einen effektiven Trainingsprozess aus und hat Mechanismen implementiert, welche für eine stabile und robuste Optimierung sorgen (Schulman et al. 2017).

Der Algorithmus wurde 2017 von der Forschungseinrichtung OpenAI vorgestellt und konnte sich seither in einer Vielzahl von Aufgabenbereichen bewähren.

Bewertungsfunktion

Für die Evaluation der durch den Agenten ausgeführten Aktionen wurde eine Bewertungsfunktion definiert, welche durch zwei Komponenten beschreiben wird. Die erste Komponente bewertet die Innenraumtemperatur in Zusammenhang mit der benötigten Heiz- oder Kühlenergie. Die zweite Komponente analysiert die Beleuchtungsstärke am Messpunkt B01 (siehe Abbildung 1) in Abhängigkeit des Energiebedarfs der Leuchtmittel. Die Summe beider Komponenten bildet die Bewertungsfunktion, welche zu jedem Zeitschritt des Simulationsdurchlaufes für den Agenten eine Belohnung ermittelt.

Für die Zusammenführung der einzelnen Komponenten ist es relevant deren Größenordnung aufeinander abzustimmen. Bei den definierten Komponenten ist jeweils eine maximale Belohnung eines Wertes von 0,2 möglich. Können beide Bedingungen simultan voll erfüllt werden, beträgt die maximale Belohnung somit 0,4. Weicht dieser Wert von den als Sollzuständen definierten Zuständen ab, hat dies eine Reduzierung des Rückgabewertes zur Folge. Um anhand der Einflussparameter Beleuchtungsstärke, Innenraumtemperatur und Energiebedarf aufeinander abgestimmte Ausgaben der Bewertungsfunktion zu erreichen, wurden Skalierungsfaktoren definiert. Diese Skalierungsfaktoren bestimmen die Gewichtung der Parameter der Bewertungsfunktion und wurden anhand eines iterativen Prozesses festgelegt.

Abbildung 6 zeigt die resultierende Belohnungskomponente in Abhängigkeit der Innenraumtemperatur (T_{01}) und des Energiebedarfs (Q) durch das Heizen oder das Kühlen. Die Innenraumtemperatur ist auf der x-Achse aufgetragen, welche sich in drei Abschnitte gliedert. Diese sind der im Innenraum einzuhaltende Temperaturbereich von 20 °C bis 26 °C sowie dessen Unter- und Überschreitung. Ein Abweichen des Sollbereichs führt zu einer Minderung der Belohnung. Diese ist definiert als der Betrag der Abweichung in °C multipliziert mit dem Faktor 0,2. Der Energiebedarf ist auf der y-Achse abgebildet. Eine Reduzierung der Belohnung findet um den Bedarf an Heiz- oder Kühlenergie in Kilowatt multipliziert mit einem Skalierungsfaktor von 0,22 statt.

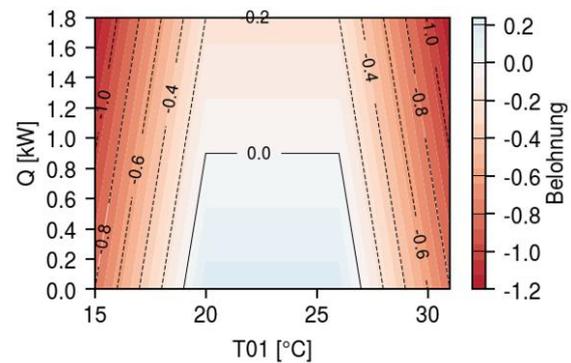


Abbildung 6: Belohnungskomponente abhängig vom Heiz- und Kühlenergiebedarf (Q) sowie der Innenraumtemperatur (T_{01})

Abbildung 7 zeigt die resultierende Belohnungskomponente in Abhängigkeit der Innenraumbeleuchtung an der Position B01 und des Energiebedarfs (Q) durch die Leuchtmittel. Die Beleuchtungsstärke an der Position B01 ist auf der x-Achse und der Energiebedarf auf der y-Achse aufgetragen. Die Bewertung der Beleuchtungsstärke teilt sich in zwei Abschnitte ein. Diese sind der Bereich unterhalb sowie oberhalb der geforderten 500 lx . Wird die Beleuchtungsstärke von 500 lx unterschritten, reduziert sich die Belohnung um den Wert der Unterschreitung in Lux dividiert durch den Skalierungsfaktor 500. Bei einer Überschreitung reduziert sich die Belohnung um den Wert der Überschreitung in Lux dividiert durch den Skalierungsfaktor 12500, jedoch nur wenn die Leuchtmittel durch den Agenten eingeschaltet wurden. Eine Reduzierung der Belohnung infolge des Energiebedarfs der Leuchtmittel findet um den Betrag des Energiebedarfs in Kilowatt, multipliziert mit einem Skalierungsfaktor von 18 statt.

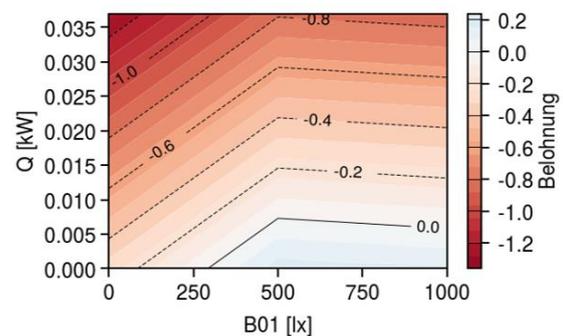


Abbildung 7: Belohnungskomponente abhängig vom Leuchtmittelenergiebedarf (Q) und der Beleuchtungsstärke an der Position B01

SIMULATION

Die für das bestärkende Lernen notwendige Interaktion mit einem Umfeld wurde durch eine bauphysikalische Simulation zum Innenraumklima sowie den Beleuchtungsstärken im Innenraum abgebildet.

Die mit dem neuronalen Netz ermittelten Vorgaben für die Regelung der Raumheizung/-kühlung, der künstlichen Beleuchtung, sowie des Transmissionszustandes der adaptiven Verglasung werden in der angewandten bauphysikalischen Simulation berücksichtigt und führen zu einer Veränderung der Raumtemperatur, der Helligkeit und des Bedarfs an Energie für die Konditionierung. Über die Beurteilung der, zu Beginn zufälligen, Regelzustände durch die Bewertungsfunktion erfolgt eine sukzessive Verbesserung des Regelverhaltens des Netzes. Das Zusammenwirken von neuronalem Netz und der bauphysikalischen Simulation folgt dem in Abbildung 5 gezeigten Schema des bestärkenden Lernens.

Um dem Agenten die Möglichkeit zu bieten, ausreichende Informationen über das Umfeld zu erlangen, ist es notwendig, den definierten Simulationsaufbau fortlaufend zu wiederholen. Die Simulationsaufrufe wurden in Längen von einem Monat eingeteilt, welche als Episode bezeichnet werden.

Verwendet wurde die Simulationssoftware TRNSYS 18, welche neben der Betrachtung des Innenraumklimas eine Berechnung der tageslichtabhängigen Beleuchtungsstärken durch die Verknüpfung mit der Software DaySIM ermöglicht.

Der Arbeitsablauf der Simulation ist in Abbildung 8 dargestellt. Dieser gliedert sich in drei wesentliche Abschnitte: das Modellieren und Definieren der Rahmenbedingungen, die Durchführung der Simulation sowie die Ausgabe und Evaluation.

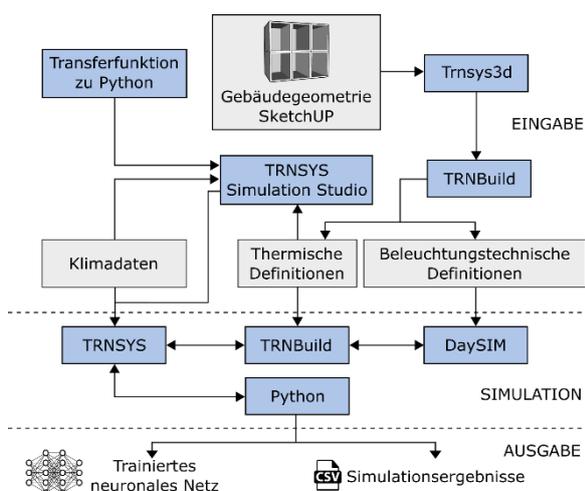


Abbildung 8: Flussdiagramm des Simulationsaufbaus

Bestandteil der Modellierung sind die Gebäudegeometrie, die Transferfunktion zu Python, die Klimadaten sowie die Definitionen thermischer und beleuchtungstechnischer Eigenschaften des modellierten Gebäudes. Diese Eigenschaften orientieren sich an den tatsächlichen Gegebenheiten des Fassadentestgebäudes. Zu den thermischen Definitionen zählen die für das Heizen und Kühlen der Räume festgelegte maximale Leistung von 1,83 kW bzw. 1,00 kW sowie Angaben zu dem Wärmedurchgangswiderstand der Wände und Decken. Beleuchtungstechnische Definitionen sind Reflexions- und Transmissionsseigenschaften der Materialien des Modells. Für die schaltbare Verglasung wurden sieben im Transmissionsgrad unterschiedliche Schaltstufen definiert. Diese sind in den thermischen und beleuchtungstechnischen Einstellungen definiert. Zudem wurde eine Luftwechselrate nach DIN EN 12831-1 von 0,5 1/h angenommen. Die für die Simulation verwendeten Klimadaten stammen von der Messdatenerfassung des Fassadentestgebäudes für das Jahr 2018.

Wird die Simulation ausgeführt, so kommunizieren die Programme TRNSYS 18, TRNBuild, DaySIM sowie Python kontinuierlich miteinander. Für den Transfer der Klimadaten und für die Kopplung der Module des Modellaufbaus sorgt TRNSYS 18, während TRNBuild für die thermische Simulation und DaySIM für die beleuchtungstechnische Auswertung verantwortlich sind. Der Einfluss der Leuchtmittelgruppen wurde auf Grundlage von Messungen der Beleuchtungsstärke am realen Objekt ermittelt und in den Simulationsablauf integriert. Über die Programmiersprache Python wurde die Regelung auf Grundlage des bestärkenden Lernens implementiert.

Zur Integration von Python stellt TRNSYS in der Version 18 zwei Komponenten zur Verfügung. Diese wurden im Vorfeld getestet, konnten jedoch den Ansprüchen des Simulationsaufbaus nicht gerecht werden. Durch die Unterstützung des Instituts für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung der Universität Stuttgart konnte schließlich mit dem Type997 eine Transferfunktion implementiert werden, welche die Anforderungen erfüllt (Asenbeck 2019).

ERGEBNISSANALYSE UND DISKUSSION

Die nachfolgende Evaluation zeigt die Ergebnisse der Regelung nach 500 Episoden. Die Darstellung begrenzt sich auf zwei Zeitintervalle mit der Länge von jeweils einer Woche. Diese zeigen repräsentativ einen Zeitraum der Umgebungsbedingungen im Winter (01. bis 07. Januar 2018) und im Sommer (01. bis 07. Juli 2018).

Nachfolgend dargestellt sind die Messdaten zur Außentemperatur (T_{Amb}) und Globalstrahlung (PNV)

für die erste Woche im Januar und Juli 2018 (Abbildung 9 und Abbildung 10).

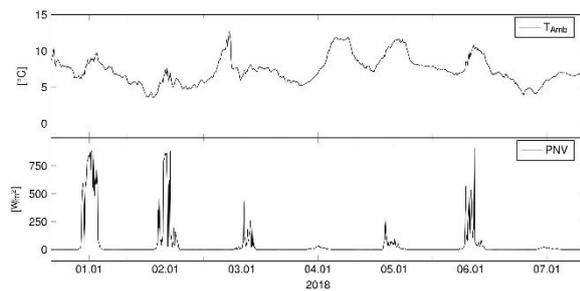


Abbildung 9: Außentemperatur und Globalstrahlung im Zeitraum vom 01. bis 07. Januar 2018

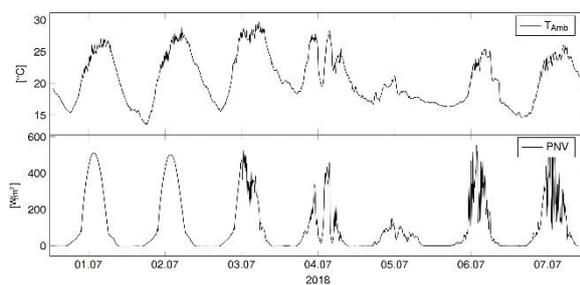


Abbildung 10: Außentemperatur und Globalstrahlung im Zeitraum vom 01. bis 07. Juli 2018

Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen die Resultate der vom Agenten durchgeführten Regelung für die beiden Zeitintervalle im Januar und Juli 2018. Dargestellt sind die Innenraumtemperatur (T_{01}), die Beleuchtungsstärke im Innenraum (B_{01}), die Regelung der Heizung ($HT_{Setpoint}$) und Kühlung ($CL_{Setpoint}$), die Regelung der Leuchtmittelgruppen L01 und L02, der Schaltzustand der adaptiven Verglasung (Shadestep), der gesamte benötigte Energiebedarf ($Q_{HEAT} + Q_{COOL} + Q_{LIGHT}$) und die resultierende Belohnung.

Heizung und Kühlung

Die Regelung der Heizung ($HT_{Setpoint}$) und Kühlung ($CL_{Setpoint}$) erfolgt über das Definieren der Schwellwerte der Temperatur zum Aktivieren der Heizung (bei Unterschreitung des Schwellwertes) und Kühlung (bei Überschreitung des Schwellwertes).

Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass der Schwellwert der Heizung, mit vereinzelt Abweichungen, auf den geforderten Mindestwert von 20 °C eingestellt ist. Dies zeigt, dass es der Regelung gelungen ist, anhand des gegebenen Umfelds eine effiziente Einstellung zu definieren. Für die Regelung des Schwellwertes der Kühlung treten hingegen Schwankungen von 23 °C bis 28 °C auf.

Künstliche Beleuchtung

Für die Regelung der künstlichen Beleuchtung können die zwei Leuchtmittelgruppen L01 und L02 über je sieben Zustände der Intensität angesteuert werden.

Bei der Steuerung des Leuchtmittels L01 ist zu erkennen, dass dieses bei geringer Globalstrahlung eingeschaltet und bei hoher Globalstrahlung ausgeschaltet wird. Damit gelingt es der Regelung, die geforderten 500 lx Beleuchtungsstärke am Messpunkt B01 einzuhalten.

Die Leuchtmittelgruppe L02 wurde hingegen durch die Regelung dauerhaft ausgeschaltet. Nachvollziehbar ist dies bei der Betrachtung der Beleuchtungsstärkenverteilung und des Energiebedarfs der Leuchtmittelgruppen. Bei maximaler Beleuchtungsstärke aller Leuchtmittel liegt der Beitrag der Leuchtmittelgruppe L02 auf den für die Bewertung herangezogenen Messpunkt B01 gerade einmal bei 12% . Mit einem Energiebedarf von 13 W benötigt die Gruppe L02 allerdings 35% der Energie am Gesamtanteil der künstlichen Beleuchtung. Die Verwendung der Leuchtmittelgruppe L02 ist daher ineffizient für das Einhalten des Sollwertes am Messpunkt B01. Dies hat die Regelung erkannt und vermeidet daher das Zuschalten der Leuchtmittelgruppe L02.

Adaptive Verglasung

Die adaptive Verglasung bietet die Möglichkeit, durch eine stufenweise Einstellung der Transmission sowohl auf die belichtungstechnischen als auch thermischen Anforderungen im Innenraum Einfluss zu nehmen.

Bei Betrachtung der Regelung der adaptiven Verglasung ist feststellbar, dass die Schaltstufe sowohl im Januar als auch im Juli vermehrt auf den Wert Null geschaltet wird, was einer maximalen Transmission entspricht. Hierdurch lässt sich die Notwendigkeit der Benutzung der Leuchtmittel reduzieren.

Beeinflusst wird dieses Resultat durch die unterschiedliche Einflussnahme des Schaltzustandes der Verglasung auf das sichtbare Licht und die gesamte in den Raum eingetragene Strahlungsleistung. Während der Energiedurchlassgrad (g-Wert) zwischen $17,4\%$ bis $21,4\%$ liegt, kann die Transmission des sichtbaren Lichts (T_{vis}) zwischen $3,4\%$ bis $26,4\%$ variieren (Haase u. Husser 2018). Infolgedessen steht der Regelung für die Beeinflussung der Innenraumtemperatur ein Schalhub beim g-Wert von $4,0\%$ zur Verfügung, während die Beeinflussung des sichtbaren Lichtes einen Schalhub beim Lichtdurchgang von $23,0\%$ aufweist. Eine Einflussnahme auf die belichtungsabhängigen Parameter ist somit deutlich größer als die auf die Innenraumtemperatur bzw. die Energieeinträge durch die Verglasung.

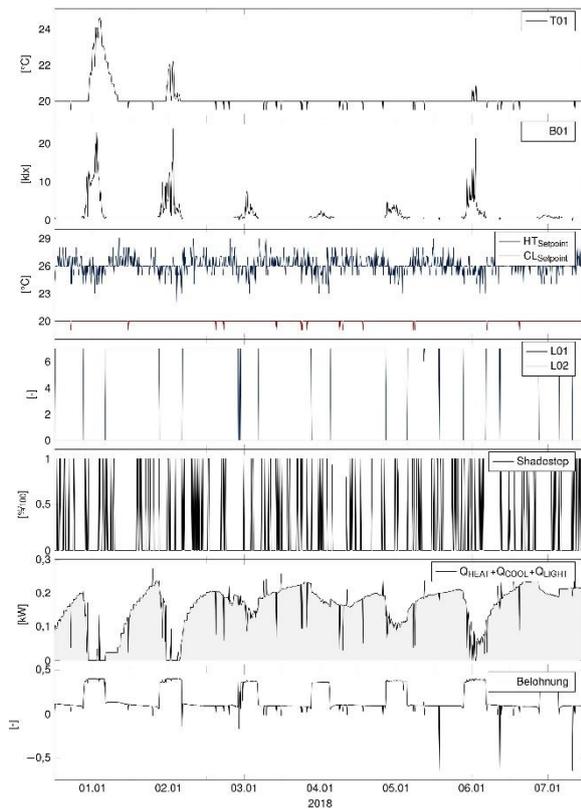


Abbildung 11: Regelung nach 500 Episoden, für den Zeitraum vom 01. bis 07. Januar 2018

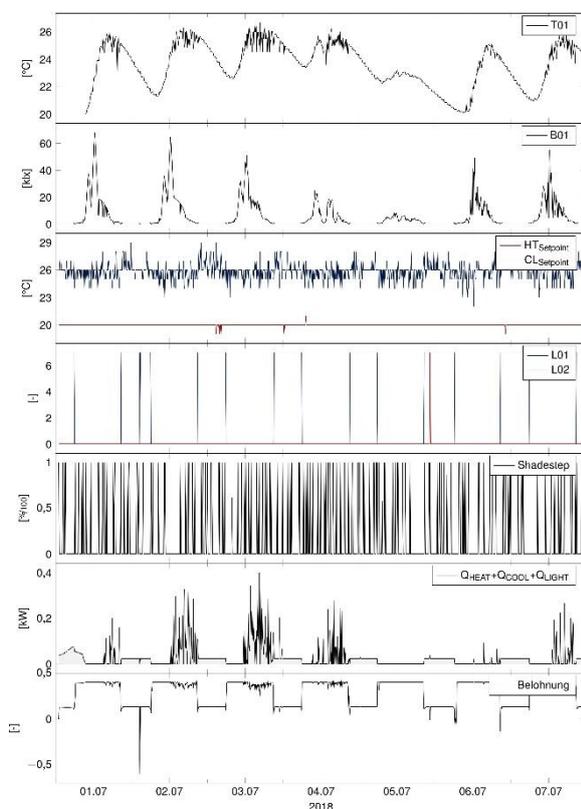


Abbildung 12: Regelung nach 500 Episoden, für den Zeitraum vom 01. bis 07. Juli 2018

Generalisierung

Das in Abbildung 13 dargestellte Zeitintervall, vom 01. bis 07. Januar 2019, befindet sich außerhalb der für das Einlernen des neuronalen Netzes verwendeten Klimadaten. Die Anwendung der erlernten Regelung auf einen unbekanntensatz soll aufzeigen, ob das neuronale Netz eine verallgemeinerte Repräsentation der Regelung erlernt hat.

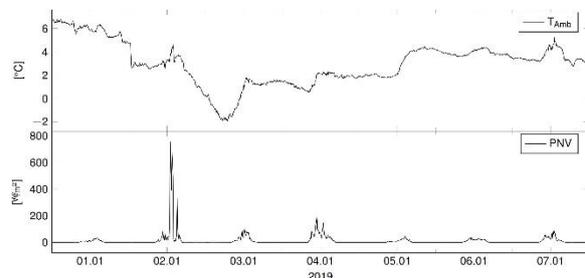


Abbildung 13: Außentemperatur und Globalstrahlung im Zeitraum vom 01. bis 07. Januar 2019

Bei Betrachtung der in Abbildung 14 dargestellten Ergebnisse der Regelung ist zu erkennen, dass die Schwellwerte der Heizung und Kühlung sowie die Steuerung der Beleuchtung und der Verschattung in gleichem Maße wie bei den zuvor betrachteten Zeitintervallen im Januar und Juli 2018 ausgeführt werden. Somit kann gezeigt werden, dass die erlernte Strategie nicht nur auf den in der Simulation verwendeten Klimadatenansatz anwendbar ist, sondern im Rahmen der Untersuchung einer generalisierten Regelung entspricht.

Für den Einsatz der entwickelten Regelung unter realen Bedingungen werden jedoch noch weitere Untersuchungen benötigt, um die Zuverlässigkeit der Regelzustände zu erhöhen und den Lernprozess zu verkürzen. Für die Planung von Raum- und Gebäuderegulungen könnte diese Technik jedoch bereits als effizientes Werkzeug eingesetzt werden, um komplexe Zusammenhänge der Systeme zu erkennen.

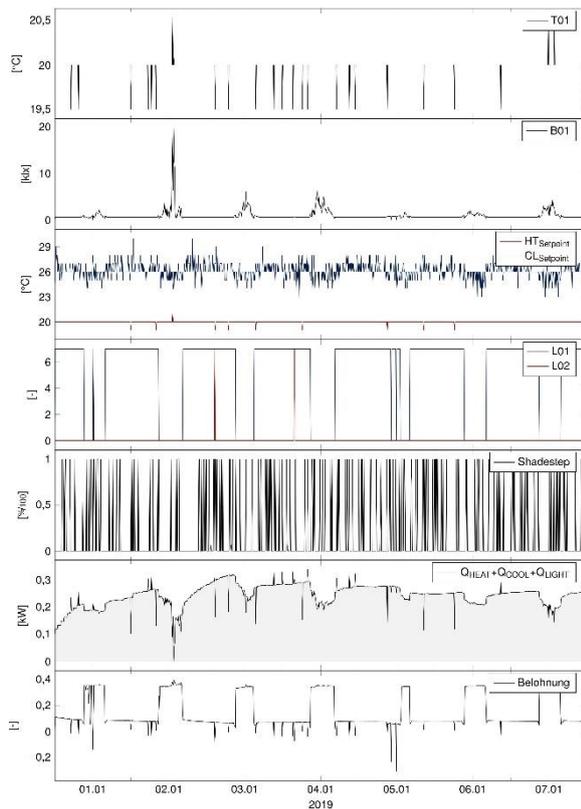


Abbildung 13: Regelung nach 500 Episoden, für den Zeitraum vom 01. bis 07. Januar 2019

ZUSAMMENFASSUNG

Um den steigenden Anforderungen an Raum- und Gebäuderegeln gerecht zu werden, wird in diesem Beitrag eine sich selbst konditionierende Raumregelung präsentiert, welche möglichst viele Einflussparameter berücksichtigt.

Die Anforderungen an die Raumregelung waren das energieeffiziente Einhalten einer Beleuchtungsstärke von mindestens 500 lx an einem definierten Messpunkt und einer Innenraumtemperatur von 20 °C bis 26 °C. Der Einfluss auf das Innenraumklima und die Beleuchtungsstärke im Innenraum konnte durch die Regelung einer adaptiven Verglasung, der künstlichen Beleuchtung sowie der Heizung und Kühlung erfolgen.

Anwendung in der Regelung finden Methoden des bestärkenden Lernens unter Einbindung eines künstlichen neuronalen Netzes. Bestärkendes Lernen zeichnet sich durch Interaktionen mit einem Umfeld aus, welche die Lernprozesse der belebten Natur nachbilden. Als Umfeld diente dem Algorithmus eine Simulation zum Raumklima und der Innenraumbeleuchtung eines Referenzgebäudes. Anhand von Interaktionen mit der Simulation erfährt die Regelung in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke und Temperatur im Innenraum sowie deren Energiebedarf eine Bewertung. Diese Bewertung ermöglicht der Regelung eine sukzessive Anpassung und Optimierung des Regelverhaltens.

Anhand der Simulation konnte gezeigt werden, dass eine Regelung auf Grundlage von Methoden des bestärkenden Lernens in der Lage ist, einen Raum auf eine geforderte Temperatur und Beleuchtungsstärke wirkungsvoll zu regeln. Eine besondere Effizienz zeigte die Steuerung der künstlichen Beleuchtung durch das Deaktivieren ineffizienter Leuchtmittel zum Einhalten der Anforderungen.

LITERATUR

- Asenbeck, S., 2019. Quickstart Guide for the Trnsys-Python-Interface Type997 and TrnysysPy.py, Universität Stuttgart.
- DIN EN 12464-1, 2011. Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten, Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen.
- DIN EN 12831-1, 2017. Energetische Bewertung von Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast, Teil 1: Raumheizlast, Modul M3-3.
- Dutta, S., 2018. Reinforcement Learning with TensorFlow. Packt Publishing, Birmingham.
- Ertel, W., 2016. Grundkurs Künstliche Intelligenz. 4., überarbeitete Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden.
- Frochte, J., 2019. Maschinelles Lernen: Grundlagen und Algorithmen in Python. 2., aktualisierte Auflage, Hanser Verlag, München.
- Haase, W. und Husser, M., 2018. Adaptive Verglasungssysteme: Einsatzbereiche, energetische und tageslichttechnische Evaluierung, Regelungsstrategien. Abschlussbericht, Forschungsinitiative Zukunft Bau, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- Kalmbach, S., 2019. Entwicklung, Implementierung und Evaluation eines über Reinforcement Learning trainierten künstlichen neuronalen Netzes zur Raumkonditionierung, Masterarbeit, Universität Stuttgart.
- Schulman, J. et al., 2017. Proximal Policy Optimization Algorithms, arXiv:1707.06347v2 [cs.LG].
- Sutton, R. S. und Barto, A. G., 2018. Reinforcement learning: an introduction. 2nd edition, MIT Press, Cambridge, Mass.

POTENTIALE PROGNOSEBASIERTER EINSATZPLANUNG VON LUFTWÄRMEPUMPEN

S. Muschik¹, M. Ehrenwirth¹ und T. Schrag¹

¹Institut für neue Energie-Systeme, Technische Hochschule Ingolstadt, Ingolstadt, Deutschland

<https://www.thi.de/go/energie>

ABSTRACT

A prognosis-based deployment planning with short-term prognosis for an air-source heat pump system with thermally activated building structures as storage is simulated. The overall objective is to evaluate the effects of a higher operational flexibility that can be achieved by this approach. The theoretical and technical potential is determined by analysis of ambient temperature timeseries and building simulation. The annual coefficient of performance is improved by planning the operation at high outdoor temperatures, the electrical energy demand for the heat pump operation can be reduced accordingly. Overall, the efficiency and also the effectivity of the heating supply is improved.

KURZFASSUNG

Diese Arbeit beschreibt die Simulation eines Gebäudes unter Berücksichtigung einer prognosebasierten Einsatzplanung mit kurzfristiger Prognose für eine verbaute Luft-Wärmepumpe unter Nutzung der Speicherkapazitäten aktivierter Bauteile. Das theoretische Potential wird durch Analyse von Temperaturzeitreihen ermittelt. Anschließend wird durch eine Simulation ein technisch nutzbares Potential ermittelt. Dieses fällt vorerst deutlich geringer aus und soll später durch Optimierungsmaßnahmen erhöht werden. Die Simulation wird für ein Gebäude mit zwei Dämmstandards und unterschiedlichen Leistungsgrößen der Wärmepumpe durchgeführt. Die übergeordnete Zielsetzung ist es die Auswirkungen einer somit erreichbaren höheren Einsatzflexibilität zu bewerten.

Durch die Einsatzplanung bei hoher Quellentemperatur wird die Jahresarbeitszahl verbessert. Insgesamt wird die Effizienz und auch die Effektivität der Heizwärmeversorgung verbessert: Der elektrische Energiebedarf für den Wärmepumpenbetrieb wird reduziert.

EINLEITUNG

Mit der steigenden Verbreitung von Wärmepumpen im Bereich der Gebäudebeheizung und Warmwasserbereitung steigt die installierte elektrische Leistung. Ein Szenario für Deutschland im Jahr 2050, mit starker Verbreitung von Wärmepumpen und bedarfsgeführtem Betrieb, weist eine maximale elektrische Last durch die installierten Wärmepumpen oberhalb von 60 GW auf (Atabay et al. 2017). Im Vergleich dazu lag die Jahreshöchstlast im deutschen Stromnetz 2019 bei 76,5 GW (ENTSO-E 2020) und damit in einer ähnlichen Größenordnung wie die bereits heutige gesamte Jahreshöchstlast. Vor diesem Hintergrund bestehen bereits Untersuchungen, die darauf abzielen, thermisch aktivierte Bauteile für die Entlastung des Stromnetzes zu nutzen und bei hohem Dargebot Erneuerbarer Energien elektrische Energie in Form von Wärme zu speichern (Bauer et al. 2013 & Le et al. 2020).

Weitere Untersuchungen befassen sich mit dem strompreisoptimierten Einsatz von Wärmepumpen. Die Planung der Einsatzzeiten anhand der mittleren, stundenscharfen Außentemperaturen ist auch bereits in die Ausgestaltung von Kontrollstrategien eingeflossen (Le et al. 2020).

Die Schwankungsbreite der Außentemperatur ist sowohl im Jahresverlauf als auch im Verlauf weniger Tage hoch. Dies bietet die Möglichkeit mit einer dahingehend optimierten Betriebsstrategie eine erhöhte Effizienz des Betriebs zu erreichen.

Grundsätzlich eignen sich thermisch aktivierte Bauteile gut für die Speicherung von Wärme, da mit einem geringem Temperaturhub große Wärmemengen in ein Bauteil eingebracht werden können. Dabei ist zu beachten, dass durch resultierende, höhere Raumtemperaturen ebenfalls die thermischen Verluste ansteigen. Die Simulation von einer Photovoltaik-eigenverbrauchsoptimierten Wärmepumpensteuerung mit Speicherung in aktivierten Bauteilen ergab bis zu 10 % zusätzliche Verluste, wenn in der Regelung eine maximale Raumtemperaturerhöhung um 4,5 K zugelassen wurde (Thür et al. 2018).

Luft-Wärmepumpen weisen eine von der Lufttemperatur abhängige Arbeitszahl auf. In Kombination mit thermischen Speichern bietet dies eine Option zur Optimierung.

Für einen numerisch untersuchten Fall ergibt sich ein theoretisches Potential von 20 % Einsparung elektrischer Energie (Pospíšil et al., 2018). In der genannten Untersuchung sind zusätzliche Verluste durch die Speicherung thermischer Energie noch nicht berücksichtigt.

Das zur Verfügung stehende, hohe theoretische Effizienzpotential der Wärmepumpe, in Kombination mit einer hohen Wärmekapazität von aktivierten Bauteilen führt zur Fragestellung, ob diese theoretischen Potentiale auch zu einer erhöhten Gesamteffektivität führen. Die Reduktion des elektrischen Energiebedarfs dient hierbei als Kennzahl.

Für die Gesamtsystemoptimierung sind jedoch die zusätzlichen Verluste durch thermische Speicherung und das Potential zu erhöhter Effizienz zu berücksichtigen. Daher wurde diese Untersuchung unter der Anwendung eines Gebäudemodells durchgeführt, das auch die erhöhten Transmissionsverluste und den Wärmeübergang aus dem aktivierten Bauteil abbildet.

Es ist festzuhalten, dass eine prädiktive Wärmepumpenregelung in Kombination mit thermischen Speichern sowohl eine netzdienliche, preisoptimierte und effizienzoptimierte Betriebsweise ermöglichen kann. Hier sind Zielkonflikte zu erwarten, da Netzengpässe oder niedrige Erzeugungspreise auch bei niedrigen Temperaturen und somit geringerer Arbeitszahl auftreten. Diese Zielkonflikte können durch situationsabhängige Regeln und eine Priorisierung durch den Nutzer adressiert werden. Netzdienliches Verhalten kann beispielsweise durch den Netzbetreiber bei prognostizierten Engpässen angefordert werden. Hier könnte für Deutschland das bestehende Netzampelkonzept des BDEW umgesetzt werden (BDEW 2017).

Die übergeordnete Forschungsfrage lautet: In welchem Maße führen die beschriebenen, theoretischen Einsparpotentiale durch eine prognosebasierte Regelung von Luft-Wärmepumpen zu einer Einsparung elektrischer Energie. Untersucht wird dies anhand einer regelbasierten Speicherbeladung, welche auf die erwarteten Temperaturen reagiert.

Als erstes wird ein Referenzgebäude ausgewählt und die Wärmeeinbringung auch mit aktivierten Bauteilen bedarfsgeführt simuliert. Diese Ergebnisse werden dann als Referenzwert für die aktive Beladung der thermischen Speicher genutzt. Diese Referenz wird für den Vergleich herangezogen, um die möglichen Einsparungen elektrischer Energie und die Verbesserung der Arbeitszahl zu quantifizieren.

POTENTIALÜBERBLICK

Für die folgende Potentialabschätzung wird vereinfacht davon ausgegangen, dass eine bedarfsgeführte Betriebsstrategie die Mitteltemperatur des betrachteten Zeitraums in einer

Heizperiode trifft. Der Temperaturindikator für die Monate September bis einschließlich April ist in Abbildung 1 mit weißem Hintergrund dargestellt. Der zugrunde liegende Wetterdatensatz ist im entsprechenden Abschnitt beschrieben. Graphisch erkennbar ist eine Tendenz, dass die Länge der Zeitperiode mit der Temperaturdifferenz korreliert.

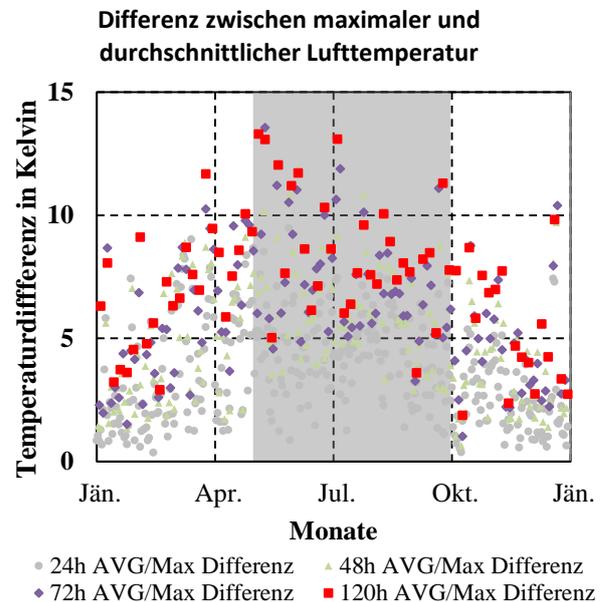


Abbildung 1: Temperaturdifferenz zwischen dem Maximalwert und dem Durchschnitt einer Zeitperiode, grau hinterlegt: Sommerperiode, nicht betrachtet

Eine Auswertung der Häufigkeit von Temperaturdifferenzen unterschiedlicher Ausprägung ist in den Abbildungen 2 & 3 dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Anzahl der einzelnen Zeiträume wurde eine relative Betrachtung gewählt. Die Anzahl der Stunden mit höheren Differenztemperaturen steigt mit der Dauer der betrachteten Zeitperiode an.

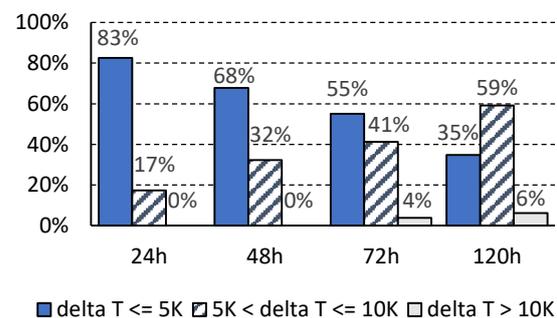


Abbildung 2: Anteil der Zeiträume einer Heizperiode mit hohen Temperaturdifferenzen zwischen T_{max} und T_{mittel} von Region 10

In 17 % aller 24 Stunden Zeitperioden und in 65 % aller 120 Stunden Zeitperioden liegen die Maximaltemperaturen um mindestens fünf Kelvin oberhalb der Mitteltemperaturen. In Abbildung 3 ist die

Auswertung für den Vergleich von Maximal- und Minimaltemperaturen dargestellt.

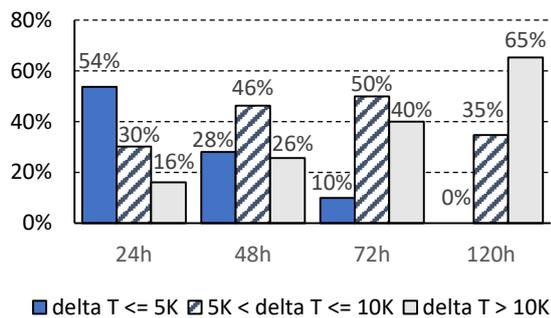


Abbildung 3: Anteil der Zeiträume einer Heizperiode mit hohen Temperaturdifferenzen zwischen T_{max} und T_{min} von Region 10

Für eine Speicherung ist auch die Erhöhung der Vorlauftemperatur notwendig. Die möglichen Effizienzeinflüsse für angehobene Quellentemperaturen sind beispielhaft in Tabelle 1 aufgelistet. Sie basieren auf einem, nach Datenblatt linearisierten, Kennfeld einer Luft-Wärmepumpe. Dieses Kennfeld zeigt das Potential auf, dass bei einer Erhöhung von Quellentemperatur trotz ebenfalls erhöhter Senkentemperatur eine Verbesserung der Arbeitszahl möglich ist.

Die Arbeitszahl steigt bei einem Betrieb mit um 5 K erhöhter Vorlauftemperatur und einer auf 10 °C erhöhten Quellentemperatur um 14 % im Vergleich zu einem Betrieb bei 0 °C.

Tabelle 1:
Kennfeldbasierte Auswertung der möglichen Einsparungen abhängig von Quellen- und Senkentemperatur

Quellentemperatur	+5 K	+10 K	+10 K	+15 K
Senke: 30 °C	+5 K	+5 K	+10 K	+15 K
-15 °C	2.62			
-10 °C	3.22	11 %		
-5 °C	3.82	7 %	31 %	16 %
0 °C	4.42	4 %	23 %	9 %
5 °C	5.01	2 %	18 %	4 %
10 °C	5.61	0 %	14 %	0 %

Bei geringeren Ausgangstemperaturen steigt die Arbeitszahl in Relation stärker an, wie der Tabelle 1 zu entnehmen ist.

Potentialabschätzung

Da das Potential zur Energieeinsparung, von der Speichergröße, der Leistungsgröße der Wärmepumpe im Verhältnis zum Bedarf und vom Temperaturverlauf abhängt, wurde im Rahmen einer Voruntersuchung eine Potentialabschätzung für den optimierten Einsatz mittels Optimierungsalgorithmus durchgeführt. Hierzu wurde die maximale

Speicherbeladung auf 100 kWh festgesetzt. Dies ist mit einer Temperaturerhöhung von Beton und Estrich um 5 Kelvin bei einer Geschossfläche von 140m² und Annahme eines idealen Speichers erreichbar. Der Wärmebedarf wurde mittels Simulation des SFH 15 Gebäudes ohne eine Bauteilaktivierung ermittelt, der maximale Bedarf innerhalb einer Zeitperiode von 24 h beträgt 49,1 kWh, innerhalb von 48 h beträgt der maximale Bedarf 93 kWh. Nähere Erläuterungen zum verwendeten Modell sind im Kapitel Simulation zu finden.

Die abgeschätzte Arbeitszahl (AZ) der Wärmepumpe für die Voruntersuchung wird mit einer konstanten Vorlauftemperatur (T_{VL}) von 35 °C und einem konstanten Gütegrad (η_{WP}) der Wärmepumpe von 0,4 ermittelt. Die Quellentemperatur (T_a) entspricht dem Temperaturverlauf des zuvor beschriebenen Wetterdatensatz.

$$AZ = \frac{T_{VL}}{T_{VL} - T_a} \cdot \eta_{WP}$$

Die Wärmepumpe wurde als ideal modulierend ohne Mindestleistung angenommen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2:
Ergebnisse der Voruntersuchung zur möglichen Einsparung durch eine optimierte Beladung

PROGNOSE HORIZONT	WÄRMEPUMPENAUSLEGUNG			
	100 %	200 %	300 %	400 %
24 h	-3,8 %	-5,2 %	-5,6 %	-5,9 %
48 h	-5 %	-6,4 %	-6,9 %	-7,1 %
72 h	-6,1 %	-7,9 %	-8,4 %	-8,7 %

Die optimierte Betriebsweise kann unter den beschriebenen Voraussetzungen bei dem verwendeten Wetterdatensatz, einem Prognosehorizont von 24h und einer Auslegung auf die vierfache Mindestleistung eine Einsparung von 5,9 %, bis hin zur 8,7 % erzielen, bei einem Prognosehorizont von 72 h.

SIMULATION

Für die Simulation wurde die CARNOT Toolbox für Matlab/Simulink des Solar-Institut Jülich verwendet (Solar-Institut Jülich). Diese bietet eine umfangreiche Bibliothek von validierten Modellen hydraulischer Komponenten und Gebäudemodellen.

Wetterdatensatz

Als Wetterdatensatz wurde das Testreferenzjahr 2010 des Deutschen Wetterdienstes genutzt, in der Form, wie es in der Toolbox zur Verfügung gestellt wird (Solar-Institut Jülich). Hier wurde auf den Datensatz eines mittleren Jahres zurückgegriffen, um das Wettergeschehen eines typischen Jahres in der Region 10 (in Süddeutschland) abzubilden.

Gebäude

Da der Fokus des Gebäudesystems auf der Wärmespeicherung in aktivierten Geschossdecken liegt und diese im Neubau mit vergleichsweise geringem Aufwand hergestellt werden können, wurden zwei exemplarische Gebäudetypen möglicher Neubaustandards ausgewählt. Es wurde auf die im Rahmen der IEA Solar Heating and Cooling Programme Task 44 definierten Typen SFH 15 & SFH 45 zurückgegriffen (Dott et al. 2013). Die in genannter Arbeit mit TRNSYS ermittelten Werte wurden zur Validation der Simulationsergebnisse mit den gleichen Wetterdaten verwendet. Die ermittelte Abweichung beträgt 10,8 % (SFH 15) bzw. 1,1 % (SFH 45) (Peter et al. 2014).

Der SFH 45 Bauteilaufbau liegt in etwa im Bereich der deutschen Mindeststandards für Neubauten. Die Wärmedurchgangskoeffizienten der Fenster sind 15 % höher, die der Bodenplatte um 49 % geringer und die Koeffizienten für Wand sowie Dach sind ähnlich (Bundesregierung Deutschland 2015) und (Dott et al. 2013).

Das Gebäude wird als Ein-Knoten Gebäudemodell ohne Zonierung in der Simulation abgebildet. In Tabelle 3 sind die Wärmebedarfswerte für Region 10 aufgelistet.

Tabelle 3:
Gebäudedaten

PHYSIKALISCHE GRÖßE	WERT
Beheizte Wohnfläche	140 m ²
Raumhöhe	2,6 m
Abmessungen	7 m × 10 m
Thermische Kapazität	19,44 $\frac{\text{kWh}}{\text{K}}$
SFH 15 Referenzsystem	31,9 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$
Wärmebedarf TRY2010 Region 10	
SFH 45 Referenzsystem	75,1 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$
Wärmebedarf TRY2010 Region 10	

Wärmeübergabesystem & aktivierte Bauteile

Zusätzlich zum ursprünglichen Referenzsystem mit einem Wärmeübergabesystem wird ein Modell eines aktivierten Bauteils dem Gebäudemodell hinzugefügt. Das vorhandene Wärmeübergabesystem wird hydraulisch parallel zu den thermisch aktivierten Bauteilen angebunden und der konstante Massenstrom gleich auf die beiden Systeme aufgeteilt. Während der Beladung sorgt die verwendete Steuerung dafür, dass 80 % des Massenstroms durch die aktivierten Bauteile geleitet wird. Bei gleicher Verteilung steigt die Vorlauftemperatur während der Beladung stärker an und die mögliche Arbeitszahlverbesserung wird in der genutzten Konfiguration nicht erreicht, daher wurde die Massenstromaufteilung für die Konfiguration angepasst.

Das Modell der aktivierten Bauteile basiert auf einem vorhandenen Modell (Koschütz & Lehmann 2000).

Wärmepumpe

Die Auswahl der Luftwärmepumpe fiel auf ein marktverfügbares Modell, welches eine annähernd konstante Wärmeleistung über den zulässigen Temperaturbereich der Außenluft bereitstellt.

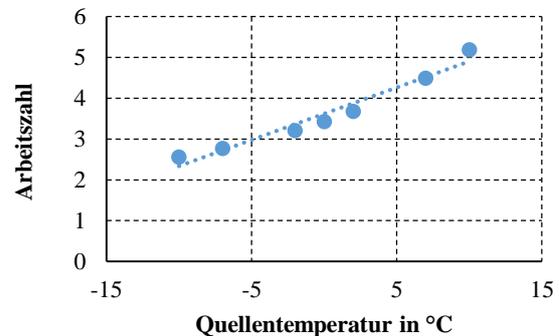


Abbildung 2: Arbeitszahl der simulierten Wärmepumpe in Abhängigkeit von der Quelltemperatur

In Abbildung 2 ist der Verlauf der Arbeitszahl für eine konstante Vorlauftemperatur von 35 °C und einer Spreizung von 6 K dargestellt, die sich bei dem verwendeten und parametrisierten Modell der Wärmepumpe in der Simulation ergibt.

Weitere Vorlauftemperaturen wurden getestet und ergaben ein typisches Kennfeld.

Die Verdampfervereisung wird im verwendeten Simulationsmodell nicht abgebildet, jedoch ist die resultierende Verringerung der Arbeitszahl implizit durch die auf Prüfstandswerten basierenden Datenblattwerte enthalten. Die minimale Arbeitszahl wird auf 2,28, die maximale auf 5,78 festgelegt. Dies entspricht den Quelltemperaturen -15 °C und 12 °C. Die Wärmeverluste der Wärmepumpe werden für einen der Außenlufttemperatur ausgesetzten Monoblock simuliert.

Um gleichartige Betriebsbedingungen für die Speicherbeladung und den wärmebedarfsgeführten Betrieb zu ermöglichen, wurde die Mindestlaufzeit auf eine Stunde gesetzt. Da die Wärmepumpe mit einer thermischen Kapazität modelliert ist, werden somit sehr kurze Betriebszeiten verhindert, die sich negativ auf die Gesamteffizienz auswirken können.

Prognose und Speicherbeladung

Es wird von einer idealen Prognosegüte für die folgenden 24 Stunden ausgegangen, etwaige Prognosefehler bleiben unberücksichtigt. Der rollierende Mittelwert der Temperaturprognose der folgenden 24 Stunden wird gebildet, um nur bei Unterschreitung der festgelegten Grenztemperatur die Speicherbeladung auszulösen. Somit sollen nicht notwendige Beladungen vermieden werden, die den Strombedarf gegenüber einem rein bedarfsgeführten System erhöhen.

Um dieses Ziel zu erreichen, wird ebenfalls auf Basis der Betriebszeiten in der Referenzsimulation die Beladung erst ab einem definierten Zeitfenster erlaubt.

Dies entspricht einer manuellen oder kalendarischen Aktivierung der Speicherbeladung, ähnlich einem Sommer/Wintermodus des Wärmepumpensystems.

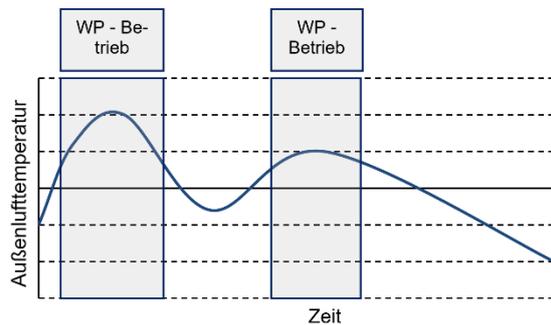


Abbildung 3: Arbeitszahl der Wärmepumpe in Abhängigkeit von der Quelltemperatur

Die prognosebasierte Steuerung ist so ausgestaltet, dass fallende Temperaturen in den folgenden neun Stunden erkannt werden. Die direkt folgende Stunde ($t+1$) wird bei der Betrachtung ignoriert, somit beginnt die Speicherbeladung bereits vor Erreichen des Temperaturhöhepunkts. Somit kann im Idealfall der Zeitraum mit maximaler Temperatur zur Speicherbeladung genutzt werden, dies ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt. Sofern die Temperaturen $T_{(t+2)}$ bis $T_{(t+9)}$ geringer als die aktuelle Temperatur sind und die zuvor beschriebenen Bedingungen eingehalten werden, wird die Speicherbeladung gestartet.

Parameterstudie

Im Rahmen der Simulationen wurde eine Parameterstudie durchgeführt, variiert wurde hierbei die Nennleistung der Wärmepumpe und der Gebäudetyp.

Die als 100 % definierte Nennleistung orientiert sich an der tatsächlich notwendigen Leistung an den kältesten Tagen des Jahres. Je größer die Wärmepumpe dimensioniert ist, desto mehr Lastverschiebungspotential steht auch an sehr kalten Tagen bereit, da die Wärmepumpe nicht in allen Stunden laufen muss, um den thermischen Bedarf zu decken und den Speicher bei günstigen Bedingungen beladen kann.

Die Wärmepumpenleistung und -effizienz wird im Modell linear skaliert. Die nichtlinearen Einflussfaktoren bei einer realen Leistungsskalierung durch Veränderung von wesentlichen Komponenten werden vernachlässigt. Der maximale Skalierungsfaktor beträgt 2,5. Die Autoren erachten die Abweichungen für das Ziel der Potentialabschätzung als hinreichend gering. Die Leistungsskalierung muss bei der, in diesem Rahmen nicht betrachteten, Auslegung der TWW-Bereitung berücksichtigt werden. Dies kann beispielsweise durch eine größere Wärmeübertragerfläche bei Verwendung eines Frischwasserspeichers geschehen.

ERGEBNISSE

Tabelle 4:
Simulationsergebnisse bei einer
Wärmepumpenauslegung von 100 % und
bedarfsgeführter Betriebsweise

PHYSIKALISCHE GRÖßE	WERT
SFH 15 Bedarfsgeführte Betriebsstrategie mit aktivierten Bauteilen	29,9 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$
SFH 45 Bedarfsgeführte Betriebsstrategie mit aktivierten Bauteilen	73,7 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$

In Tabelle 4 sind die an das Gebäude gelieferte Energiemengen dargestellt, es ergibt sich eine Abweichung zu den Werten des Referenzbetriebs ohne Verwendung von aktivierten Bauteilen von -6,4 % für das SFH 15 und -1,9 % für das SFH 45.

In den Tabellen 5 und 6 ist die genutzte elektrische Energie, die an die jeweiligen Wärmeübergabesysteme gelieferte thermische Energie sowie die resultierende Arbeitszahl dargestellt. Der Abschnitt *Abweichung* stellt jeweils die relative Abweichung der Werte mit der gleichen Wärmepumpenauslegung dar.

Bei den simulierten Systemkonfigurationen steigt der elektrische Energiebedarf des Gesamtsystems mit der Erhöhung der jeweiligen Wärmepumpenleistung, gleichzeitig sinkt die Arbeitszahl. Dies gilt im Vergleich verschiedener Systemgrößen mit gleicher Betriebsstrategie.

Im direkten Vergleich der beiden Betriebsstrategien fällt auf, dass die Jahresarbeitszahl bei aktiver Speicherladung steigt. Eine Ausnahme hierzu stellt die maximale Wärmepumpenauslegung des SFH 45 Hauses dar, bei dem die zusätzlich an das Gebäude abgegebene Wärme durch den überproportional gestiegenen Strombedarf in einer schlechteren Jahresarbeitszahl resultiert.

Weiterhin erhöht sich die gelieferte Wärmemenge in allen Fällen der Speicherbeladung. Unter der Voraussetzung von nutzerangepassten Abschalttemperaturen kann sich der thermische Komfort durch eine höhere Temperatur im Wohnbereich erhöhen.

DISKUSSION VON EINFLUSSPARAMETERN

Der Wetterdatensatz beeinflusst sowohl das theoretische als auch das nutzbare Potential zur Arbeitszahlverbesserung. Verwendet wurde ein Datensatz, der ein typisches Jahr abbildet. Ein Jahresdatensatz mit signifikant geringerer Anzahl und/oder Amplitude der Temperaturschwankungen in der Heizperiode würde ein geringeres Potential zur Einsatzoptimierung aufweisen. Die Simulation wurde vereinfacht in Annahme einer idealen Wetterprognose durchgeführt. Reale Prognosen weisen jedoch eine geringere Prognosegenauigkeit auf.

Tabelle 5:
SFH 45 Parameterstudie: Energiemengen und
Arbeitszahl

WÄRME- PUMPEN- AUSLE- GUNG	BEDARF ELE- KTRISCH IN kWh	THERM- ISCHE ENERGIE IN kWh	ARBEITS- ZAHL
SFH 45 bedarfsgeführt			
80 %	2416	10237	4.24
100 %	2513	10314	4.10
120 %	2579	10358	4.02
140 %	2673	10443	3.91
180 %	2769	10467	3.78
250 %	3019	10575	3.50
SFH 45 mit Speicherladung			
80 %	2407	10333	4.29
100 %	2500	10497	4.20
120 %	2589	10623	4.10
140 %	2670	10729	4.03
180 %	2864	10963	3.83
250 %	3268	11301	3.46
SFH 45 Abweichung			
80 %	-0.35 %	0.94 %	1.30 %
100 %	-0.51 %	1.77 %	2.29 %
120 %	0.36 %	2.56 %	2.18 %
140 %	-0.51 %	2.74 %	3.27 %
180 %	3.43 %	4.74 %	1.26 %
250 %	8.25 %	6.87 %	-1.28 %

Tabelle 6:
SFH 15 Parameterstudie: Energiemengen und
Arbeitszahl

WÄRME- PUMPEN- AUSLE- GUNG	BEDARF ELE- KTRISCH IN kWh	THERM- ISCHE ENERGIE IN kWh	ARBEITS- ZAHL
SFH 15 bedarfsgeführt			
80 %	9278	4038	4.35
100 %	989	4180	4.23
120 %	1022	4246	4.15
140 %	1045	4285	4.10
180 %	1066	4306	4.04
250 %	1113	4358	3.91
SFH 15 mit Speicherladung			
80 %	922	4127	4.48
100 %	988	4325	4.38
120 %	1011	4388	4.34
140 %	1029	4451	4.33
180 %	1069	4569	4.27
250 %	1138	4734	4.16
SFH 15 Abweichung			
80 %	-0.64 %	2.24 %	2.90 %
100 %	-0.06 %	3.48 %	3.54 %
120 %	-1.08 %	3.35 %	4.48 %
140 %	-1.54 %	3.88 %	5.50 %
180 %	0.29 %	6.12 %	5.82 %
250 %	2.24 %	8.62 %	6.24 %

Die Prognosefehler verringern sowohl das theoretische als auch das nutzbare Potential.

Die Vorlauftemperaturen beeinflussen die Arbeitszahl der Wärmepumpe. Aufgrund von konstanten Wärmeübertrager-eigenschaften, thermischer Kapazität und Massenstrom im hydraulischen System stellt sich mit größerer Wärmepumpenleistung eine höhere Systemtemperatur im eingeschwungenen Zustand ein. Es ist davon auszugehen, dass dies der treibende Einfluss für die bei zunehmender Nennleistung der

Wärmepumpe abfallenden Jahresarbeitszahl ist. Dieser Effekt kann bei beiden Betriebsstrategien beobachtet werden.

In Kombination mit einer angepassten Regelungsstrategie der Wärmepumpenleistung kann dieser Effekt ggf. verringert werden.

Durch die nicht explizit abgebildete Vereisung des Verdampfers sind Unsicherheiten vorhanden. Durch den Betrieb bei höheren Temperaturen, mittels prognosebasierter Speicherbeladung, können Abtauzyklen unter Verwendung elektrischer Energie vermieden werden. Idealerweise kann der gesamte elektrischen Energiebedarf zur Abtauung eingespart werden, dieser bewegt sich in einer Größenordnung von ca. 3 % an elektrischem Mehrbedarf (Tegethoff et al.). Dieser Wert wurde für ein

Niedrigstenergiehaus ermittelt. Durch die verwendete, prognosegeführte Speicherbeladung kann der Effekt von häufigeren Wärmepumpenstarts auftreten. Die damit verbundenen Effizienzeinbußen sind im Modell vereinfacht nur über die thermische Kapazität des Wärmepumpenmodells abgebildet. Unter der Voraussetzung einer passend parametrisierten Raumtemperaturregelung kommt bei thermisch trägen Wärmeübergabesystemen weder durch angepasste Mindestlaufzeiten noch durch reduzierte Leistungen während der Startphase zu Einbußen des Nutzerkomfort. Die Auswirkungen der vereinfachten Abbildung der Startverluste im Modell wurde durch die festgelegte Mindestlaufzeit (1 h) reduziert.

ZUSAMMENFASSUNG & AUSBLICK

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine regelbasierte Prognosesteuerung unter Berücksichtigung eines Zeithorizonts von wenigen Stunden in Kombination mit der Einspeicherung thermischer Energie in aktivierten Bauteilen simuliert. Die Ergebnisse zeigen, dass bei Verwendung eines entsprechenden Algorithmus der elektrische Energiebedarf um bis zu 1,5 % gesenkt werden kann. Es wurde gezeigt, dass die gegenläufigen Effekte resultierend aus der für die Aktivierung der thermischen Bauteilmassen

benötigten höhere Vorlauftemperatur durch den Betrieb in günstigen Zeitfenstern überkompensiert werden können. Hierbei zeichnet sich ab, dass bei einem Gebäude mit besserem Dämmstandard auch höhere relative Einsparungen (1,5% gegenüber 0,5%) und Verbesserungen bei der Jahresarbeitszahl erreicht werden können. Ein Vergleich mit dem Betrieb an einem Pufferspeicher ist vorgesehen.

Das theoretische Potential hängt vom Temperaturverlauf ab, die Abweichungen sind signifikant, wie der Vergleich der hier vorgestellten Potentialanalyse und einer weiteren (Pospíšil et. al., 2018) aufzeigt. Eine weitergehende Analyse für zusätzliche Regionen wird angestrebt.

Diese Ergebnisse wurden ohne den Einsatz eines Algorithmus zur optimierten Einsatzplanung erzielt, entsprechend kann mit diesem Ansatz nur ein Teil (1,5 Prozentpunkte) des theoretisch erreichbaren (5,2 Prozentpunkte bei 200% Auslegung und 24h Prognosehorizont) Einsparungspotentials ausgeschöpft werden. Es ist zu erwarten, dass mit einer Erhöhung des Prognosehorizonts und in Verbindung mit einer Optimierung der Einsatzzeiten ein deutlich höherer Anteil des theoretisch möglichen Potentials erschlossen werden kann. Dazu müssen weitere Einflussfaktoren wie beispielsweise die erforderliche Vorlauftemperatur hinreichend mit einbezogen werden.

DANKSAGUNG

Das diesem Beitrag zugrunde liegende Projekt *Kompetenzzentrum Wärme&Wohnen* wurde gefördert durch den *Europäischen Fonds für regionale Entwicklung* (Förderkennzeichen: EU-1605-0003).

LITERATUR

Atabay, Dipl.-Ing. (Univ.) Dennis; de-Borja-Torrejón, Dipl.-Ing. (Univ.) Manuel; Dornmair, Dipl.-Ing. (Univ.) Rita; Kuhn, Dr.-Ing. Philipp; Maderspacher, Dipl.-Ing. (FH) Johannes; Sänger, Dipl.-Ing. (Univ.) Florian (2017): Gebäude als intelligenter Baustein im Energiesystem. Lastmanagement-Potenziale von Gebäuden im Kontext der zukünftigen Energieversorgungsstruktur in Deutschland. Hg. v. Technische Universität München. München, zuletzt geprüft am 18.03.2020.

Bauer, M., Lorz, C., Sedlmeier, M., Schwanitz, M., Fries, E., Hochhuber, J.: Beitrag zur thermischen Speicherung von Netzüberlasten infolge regenerativer Energien in Gebäuden. *Bauphysik*, Vol. 35 No. 1, S. 16–20, 2013.

BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (2017): Konkretisierung des Ampelkonzepts im Verteilungsnetz. Diskussionspapier. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bdew.de/media/documents/20170210_Konkretisierung-Ampelkonzept-Smart-Grids.pdf, zuletzt geprüft am 08.04.2020.

Bundesregierung Deutschland (24.10.2015): Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden. EnEV. In: *Bundesgesetzblatt* 2013 (Teil I Nr. 67), S. 3951–3990. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/enev_2007/EnEV.pdf, zuletzt geprüft am 12.04.2020.

Dott, Ralf; Haller, Michel Y.; Ruschenburg, Jörn; Ochs, Fabian; Bony, Jacques (2013): The Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38 Part B: Buildings and Space Heat Load. A technical report of subtask C Report C1 Part B. IEA Solar Heating and Cooling Programme.

ENTSO-E: Total Load - Day Ahead / Actual. ENTSO-E. Online verfügbar unter <https://transparency.entsoe.eu>, zuletzt geprüft am 19.04.2020.

Koschenz, Markus; Lehman, Beat (2000): Thermoaktive Bauteilsysteme tabs. 1. Aufl. Dübendorf: EMPA Energiesysteme/Haustechnik.

Le, Khoa Xuan; Huang, Ming Jun; Wilson, Christopher; Shah, Nikhilkumar N.; Hewitt, Neil J. (2020): Tariff-based load shifting for domestic cascade heat pump with enhanced system energy efficiency and reduced wind power curtailment. In: *Applied Energy* 257, S. 113976. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113976.

Peter, Andreas; Winteler, Christian; Dott, Ralf (2014): Implementation of the IEA SHC & HPP T44/A38 Boundary Conditions in Matlab/Simulink with CARNOT-blockset. A Platform Independence Check for the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38 – Subtask C. IEA Solar Heating and Cooling Programme, zuletzt geprüft am 12.04.2020.

Pospíšil, J., Špiláček, M., Kudela, L.: Potential of predictive control for improvement of seasonal coefficient of performance of air source heat pump in Central European climate zone. *Energy*, Vol. 154, S. 415–423, 2018.

Solar-Institut Juelich: CARNOT Toolbox Ver. 7.0, 2019 for Matlab/Simulink R2018b, © Solar Institut Juelich

Tegethoff, Wilhelm; Kosowski, Kai; Kühl, Lars: CO₂-Wärmepumpe für Passivhäuser. Effizienzsteigerung von CO₂-Wärmepumpen durch innovative Abtauungsverfahren. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Braunschweig, zuletzt geprüft am 06.08.2019.

Thür, Alexander; Calabrese, Toni; Streicher, Wolfgang (2018): Smart grid and PV driven ground heat pump as thermal battery in small buildings for optimized electricity consumption. In: *Solar Energy* 174, S. 273–285. DOI: 10.1016/j.solener.2018.08.087.

MODELLIERUNG UND SIMULATION EINES METALLHYDRID-SPEICHERSYSTEMS ZUR ÜBERSAISONALEN WÄRMESPEICHERUNG

F. Inschlag¹, P. Klanatsky¹ und C. Heschl^{1,2}

¹ Fachhochschule Burgenland GmbH, University of Applied Sciences, Department Energy and Environmental Management, Pinkafeld, Austria

² Forschung Burgenland GmbH, Center for Building Technology, Pinkafeld, Austria

KURZFASSUNG

Der Einsatz erneuerbarer Energiesysteme zur Wärmeversorgung von Wohngebäuden erfordert effiziente Speicherlösungen. In der vorliegenden Arbeit werden Speicherkonzepte auf Basis von Metallhydriden zur Wärmespeicherung analysiert. Im Fokus der Untersuchungen steht die Modellierung und Simulation von Metallhydrid-Speichersystemen, die in eine hydraulische Wärmeversorgungsanlage eingebunden sind. Dabei werden für die Modellierung vereinfachte Ansätze herangezogen, welche neben der reversibel nutzbaren Wasserstoffmenge bei den verwendeten Metallhydriden die Konzentrations-Druck-Isotherme und die Reaktionskinetik beinhalten.

Es sollen folgende Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Erforderliche Speicherkapazität und notwendiges Speichervolumen für die Metallhydridsysteme bei Verwendung mit einer Solarthermieanlage
- Einfluss der Reaktionskinetik auf das Betriebsverhalten und auf die erforderlichen Metallhydridmassen

Weiters wird die Auswirkung eines zusätzlichen Phasenwechselmaterials (Acetamid) auf elektrische Zusatzenergie und solaren Deckungsgrad untersucht. Die numerischen Untersuchungen wurden in der Simulationsumgebung TRNSYS 17 durchgeführt.

ABSTRACT

The efficient integration of renewable energy systems requires capable storage solutions. In this paper, a novel thermal storage concept for residential buildings will be proposed and analyzed. The storage concept is based on metal hydrides, which are integrated into the heating and domestic hot water system. To investigate the system efficiency a dynamic simulation model was developed within the simulation environment TRNSYS 17. The model ensures the thermodynamically equilibrium constraints and considers the reaction kinetics of the selected metal hydrides.

Based on the simulation model the following findings were determined:

- Required storage capacity and necessary storage volume for the metal hydride systems when thermal solar systems are used
- Impact of the reaction kinetics on the operation performance and on the required amount of metal hydride

Finally, the effect of additive phase change material (acetamide) on auxiliary electrical energy and solar coverage was examined.

EINLEITUNG

Der Anteil der durch Solarthermie-Anlagen generierten Wärmeenergie zur Warmwasserbereitung und zur Bereitstellung von Raumwärme ist in Österreich mit rund 2 % (Stand 2015) sehr gering. Für eine Erhöhung des Anteils der Solarthermie zur Deckung des energetischen Endenergieverbrauchs ist die Entwicklung verbesserter Speicherkonzepte zielführend. In diesem Zusammenhang sind vor allem Technologien besonders interessant, die es erlauben, die solare Wärme des Sommers für den Winter verlustfrei zu speichern.

Die Nutzung von Reaktionswärme bietet hierbei den Vorteil, die im Wasserstoff vorhandene Reaktionsenthalpie erst im Bedarfsfall in Wärmeenergie umzuwandeln und somit die Exergieverluste in Form von Wärme- und Durchmischungsverlusten in hohem Maße zu reduzieren.

Es gibt eine Vielzahl von Untersuchungen, die sich damit beschäftigen, den solaren Deckungsgrad unter Anwendung von Wärmespeichern zu erhöhen. Dazu werden meist Speichertechnologien betrachtet, die ihre thermisch nutzbare Energie durch Temperaturänderung bereitstellen. In einer Vielzahl von Studien wird die Wärmeversorgung (Warmwasserbereitung und Raumwärmebereitstellung) für Wohnhausanlagen und Einfamilienhäuser betrachtet.

Chotivisarut et al. (2009) führte Simulationen mit einem Modell einer zentralen Solarthermieanlage und einem Warmwasserspeicher zur saisonalen Wärmespeicherung durch. Dabei stand neben dem solaren Deckungsgrad auch die Wirtschaftlichkeit der Anlage im Vordergrund. Mit einem 50 m³ unterirdischen Wärmespeicher und einer Kollektorfläche von 5 m²

konnte ein solarer Deckungsgrad von ungefähr 76% erreicht werden.

Die Nutzung bestehender Speicher in Gebäuden, innerhalb eines kleinen Fernwärmenetzes zur saisonalen Speicherung nutzbarer Wärmeenergie, ist Gegenstand in der Arbeit von Fuller und Aye (2007).

Dongellini et al. (2015) beschäftigte sich in einer Studie damit, ein dynamisches Simulink-Modell zur Simulation einer Solarthermieanlage (bestehend aus Solarkollektoren und einem thermischen Speicher) zu entwickeln. Mit diesem Modell wurde der solare Deckungsgrad für die Warmwasserbereitung in Abhängigkeit von drei verschiedenen Brauchwasser-Bedarfsprofilen untersucht.

Im Gegensatz zu sensiblen bzw. Latent-Wärmespeichern bieten reversible thermochemische Wärmespeicher den Vorteil, die Wärme als Reaktionswärme und damit im Grunde unbegrenzt lange speichern zu können. Dies erfordert eine reversible chemische Reaktion, wie es zum Beispiel Wasserstoff mit geeigneten metallischen Verbindungen oder Komponenten zu bilden vermag. Thermodynamisch besitzt ein solches zwei Phasen Gas-Absorber-Gleichgewichtssystem nur einen Freiheitsgrad, was bedeutet, dass entweder Druck oder Temperatur frei gewählt werden können.

Die andere Größe stellt sich entsprechend der thermodynamischen Eigenschaften des Absorbers ein: Abhängig vom H_2 -Fixiervermögen des metallischen Reaktanden wird bei einem bestimmten Druck Wasserstoff aus der Gasphase unter Bildung eines sogenannten Metallhydrides gebunden, wobei Wärme freigesetzt wird. Der so gebundene Wasserstoff kann später aus dem Metallhydrid wieder ausgetrieben werden, indem man den Druck über dem Metallhydrid verringert. Dabei kühlt sich das Metallhydrid bis zu einem neuen Gleichgewichtszustand ab. Umgekehrt kann auch die Temperatur des Metallhydrides erhöht werden, was zu einem Druckanstieg über dem Metallhydrid führt.

Diese Sorptionsprozesse lassen sich in einem geschlossenen System im Prinzip unbegrenzt oft wiederholen und für bestimmte Metallhydride wurden Tausende von Zyklen bereits demonstriert (Sandrock, 1997).

Die Untersuchungen in dieser Arbeit sollen das prinzipielle Verhalten eines thermo-chemischen Speichers in Kombination mit einer Solarthermieanlage zur Wärmebereitstellung für ein Wohngebäude erläutern. Als Sorptionsspeicher wird dazu ein Metallhydridsystem betrachtet, welches für die gegebenen Randbedingungen geeignet ist. Für weitere Untersuchungen wird der Sorptionsspeicher mit einem Phasenwechselmaterial gekoppelt.

Eine ökologische (Primärenergieeinsparung, Reduktion von CO_2 -Emissionen) und eine ökonomische

(Kostenvergleich bzw. Amortisationsrechnung) Untersuchung und Bewertung sind nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

RANDBEDINGUNGEN

Gebäudemodell

Als Referenzgebäude wurde eine zweigeschossige Doppelhaushälfte mit einer Netto-Nutzfläche von 118 m^2 gewählt und als 3D Mehrzonenmodell für TRNSYS 17 modelliert. Die Bauweise kann als mittelschwer betrachtet werden. Der jährliche Heizwärmebedarf (ohne Warmwassererwärmung) beträgt rund 3259 kWh . Dies entspricht einem HWB von ungefähr $22 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Als Wärmeabgabesystem kommt eine Fußbodenheizung zur Anwendung. Die Nenn-Vorlauftemperatur beträgt 35°C . Die Infiltrationsrate durch die Gebäudehülle entspricht einer Luftwechselzahl von $n \sim 0,05 \text{ h}^{-1}$. Der bauphysikalisch erforderliche Mindestluftwechsel sowie der Luftwechsel zur Gewährleistung der Behaglichkeitsanforderungen werden über eine kontrollierte Wohnraumlüftung (KWL) mit WRG (Wärmerückgewinnung, $\eta = 0,8$) sichergestellt. Als Mindest-Zulufttemperatur wird konstant 22°C festgelegt (Nachheizregister). Die notwendige Wärmeleistung am Nachheizregister wird mit einer massenstromvariablen hydraulischen Schaltung und konstanter Vorlauftemperatur von 45°C zur Verfügung gestellt.

Klimarandbedingungen

Die numerischen Untersuchungen wurden für ein gemittelt Klima über zehn Jahre für den Standort Graz durchgeführt.

Im oberen Balkendiagramm der Abbildung 1 werden die monatlich bilanzierten Kelvintage abgebildet. Diese beschreiben im Wesentlichen die Außenlufttemperaturbedingungen am Standort. Des Weiteren sind im unteren Balkendiagramm der Abbildung 1 die monatlichen Strahlungssummen auf die Horizontale, unterteilt in Direkt- und Diffusstrahlung, dargestellt.

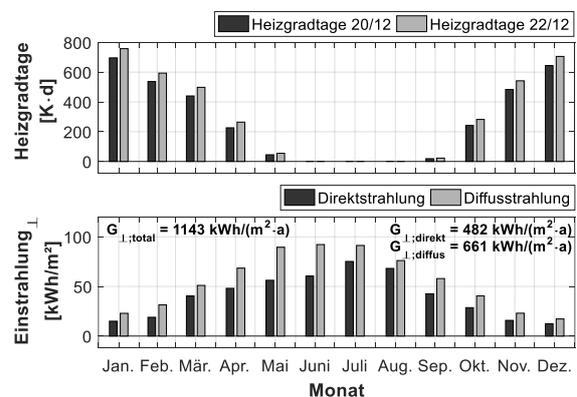


Abbildung 1: Monatsbilanzwerte für die Heizgradtage (oben) und für die solare Einstrahlung (unten) für den Standort Graz

Typisch für Standorte in dieser Klimaregion ist die Aufteilung zwischen direkter und diffuser Solarstrahlung. Diese beträgt im langjährigen Mittel rund 40/60. Die Kenntnis darüber ist insbesondere dann relevant, wenn sich die Frage nach einer Sonnenstandsachsführung für das Kollektorfeld stellt. Je höher der direkte Strahlungsanteil ist, desto effizienter kann die Solarthermieanlage durch eine Sonnenstandsachsführung betrieben werden.

Beide Balkendiagramme in Abbildung 1 verdeutlichen weiters die Diskrepanz zwischen Wärmeertrag durch die Sonnenenergie und Wärmebedarf bei dem entsprechenden Temperaturniveau. Der Vergleich zwischen Wärmeertrag und -bedarf zeigt divergentes Verhalten (Solarstrahlung gering, Kelvin-tage hoch).

Warmwasserbereitung

Der in diesen Untersuchungen festgelegte tägliche thermische Nutz-Energiebedarf für die Warmwasserbereitung beträgt rund 2 kWh pro Person. Zusätzlich resultieren dynamische Wärmeverluste über die Hüllfläche des Warmwasserspeichers, welche in den Simulationsergebnissen berücksichtigt werden. Die Wassererwärmung wird über zwei interne Rohr-bündelwärmeübertrager (unterer und oberer Speicherbereich) realisiert.

Das Speichervolumen beträgt 500 dm³. Im oberen Speicherbereich befindet sich eine Elektroheizpatrone als Nachheizelement. Diese wird nur dann aktiv, wenn nicht ausreichend Wärme über das untere (direkte Solarwärme) bzw. obere Heizregister (Wärmeenergie aus dem Metallhydridspeichersystem (MHS)) zur Verfügung gestellt werden kann.

Energiebereitstellung

Die Bereitstellung thermischer Energie für die Raumwärme, die Warmwasserbereitung und die Erwärmung der Zuluft durch die KWL erfolgt über ein Solarthermie-Kollektorfeld. Das realisierbare Temperaturniveau für zwei unterschiedliche Kollektortypen wurde im Vorfeld auf Basis der statischen Wirkungsgradkennlinien bei unterschiedlichen Klimarandbedingungen (Außenlufttemperatur, Strahlungsintensität) untersucht und den erforderlichen Betriebsbedingungen für den Betrieb der TGA (FBH, DHW, LHR) sowie den Prozessbedingungen für den Hydrierungsprozess beim MHS im dynamischen Jahresverlauf gegenübergestellt.

Die Höhe der Vorlauftemperatur am Kollektor wird durch die Strahlungsintensität sowie durch die optischen und insbesondere thermischen Verluste am Kollektor bestimmt. Die maximal erreichbare Temperatur am Kollektor (Stillstandtemperatur) kann jedoch nicht genutzt werden, da in diesem Zustand der Kollektorwirkungsgrad $\eta = 0$ beträgt. Das energetisch sinnvoll nutzbare Temperaturniveau liegt immer unterhalb der Stillstandtemperatur. Der

Wirkungsgrad und somit der Energieertrag steigt mit weiterer Abnahme der Temperaturdifferenz zwischen der mittleren Kollektor- und Außenlufttemperatur.

In der Regel besitzen Vakuumröhrenkollektoren im Vergleich zu Flachkollektoren den Vorteil, dass sie bei geringeren Strahlungsintensitäten und kälteren Außenlufttemperaturen höhere Vorlauftemperaturen erreichen und somit in der kälteren Jahreszeit effektiver eingesetzt werden können. Es ist jedoch zu bedenken, dass aufgrund der geringen thermischen Verluste die Oberflächentemperatur an der Außenseite der Vakuumröhre sehr gering ist und eine Eis- oder Schneebedeckung wesentlich später abgetaut wird als bei Flachkollektoren. Dadurch kann der exergetische Mehrwert im Winter oftmals nicht genutzt werden. In den durchgeführten Simulationen wird eine mögliche Eis- oder Schneebedeckung des festgelegten Kollektorfeldes nicht berücksichtigt.

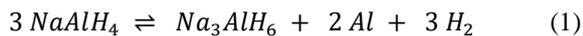
Bei Flächenheizsystemen liegt das erforderliche Temperaturniveau in der Regel unterhalb der Beladungstemperatur für die Trinkwassererwärmung. Der dynamische Leistungsbedarf ändert sich bei der Trinkwassererwärmung über den Jahresverlauf nur geringfügig. Für die Raumheizung ergeben sich in der kalten Jahreszeit die höchsten Vorlauftemperaturen, gegen Frühjahr nehmen sie stetig ab. Während geringe Vorlauftemperaturen mit dem Flachkollektor im Winter bei den entsprechenden Klimabedingungen erreicht werden können, bringt das Temperaturniveau für die Trinkwassererwärmung den Flachkollektor an seine Grenzen.

In Anbetracht dessen wurden die Simulationen ausschließlich mit Vakuumröhrenkollektoren durchgeführt.

METALLHYDRID AUSWAHL UND ZUSAMMENSETZUNG

Die Wahl der Metallzusammensetzung für den Einsatz eines Metallhydridspeichers wird im Wesentlichen durch das verfügbare Temperaturniveau, die gewünschte Speicherkapazität, die Stabilität im höheren Temperaturbereich und eine sichere Anwendung bestimmt. Das ganzjährig erforderliche Temperaturniveau ist durch die Warmwassertemperatur von ca. 65°C vorgegeben. Natriumalanat (NaAlH_4) ist ein Lewis-Komplex aus AlH_3 und NaH und enthält nominal 5,5 m% Wasserstoff (Bogdanović and Schwickardi, 1997). Die Verbindung besteht aus häufig vorkommenden Elementen mit hoher Speicherkapazität (anders als die Ti-basierten AB_x -Systeme oder LaNi_5). Das System ist im reinen Zustand nicht reversibel, was sich aber durch die Zugabe einer geringen Menge Titan ändert (0,9 – 4 mol%) (Sandrock et al., 2002).

Die Zersetzung des Natriumalanates erfolgt über zwei Stufen, die Zersetzung des Tetra-Hydrides (Glg. 1) und die Zersetzung des Hexahydrides (Glg. 2).



Bei der Zersetzung des Tetra-Hydrides beträgt die Reaktionsenthalpie $\Delta H = 37 \text{ kJ} \cdot (\text{mol H}_2)^{-1}$. Reversibel können dabei rund 2,23 m% Wasserstoff nutzbar gemacht werden. Eine höhere Reaktionsenthalpie mit $\Delta H = 47 \text{ kJ} \cdot (\text{mol H}_2)^{-1}$ wird bei der Zersetzung des Hexahydrides erreicht. Die reversible Masse an Wasserstoff ist mit 1,67 m% jedoch geringer als bei der ersten Stufe (Luo und Gross, 2004). Die Zersetzung und der Gleichgewichtsdruck des Natriumalanates in Abhängigkeit von der Temperatur sind in Abbildung 2 dargestellt.

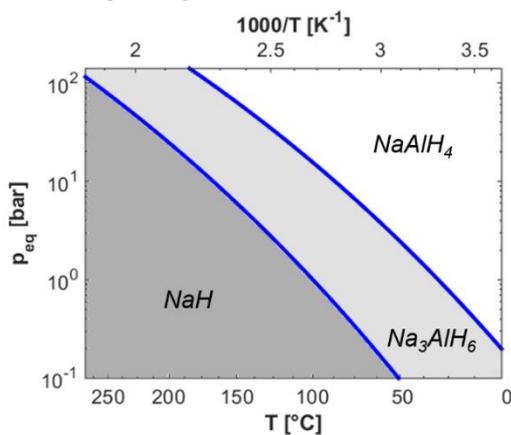


Abbildung 2: Gleichgewichtsdruck im Metallhydrid in Abhängigkeit von der Temperatur und den Zersetzungsstufen

In Abbildung 2 zeigt sich, dass bei einer Natriumalanat-Temperatur von $\vartheta = 80 \text{ °C}$ ein Gleichgewichtsdruck von $p_{\text{eq}} \approx 7,94 \text{ bar}$ resultiert. Damit im NaAlH_4 bei dieser Temperatur ein Dehydrierungsprozess ablaufen kann, muss der Gegendruck unter 7,94 bar abfallen, was für die Wahl des entsprechenden WasserstoffzwischenSpeichers von Bedeutung ist.

Insgesamt ist das Na-Al-H-System außerordentlich komplex, da die Dotierung mit Titan für Reversibilität notwendig ist, das System aus mehreren Reaktionen besteht und die bei der Desorption entstehenden Aluminiumpartikel oberhalb von 150 °C eine ausgeprägte Tendenz zum Sintern zeigen. Dies beeinflusst sowohl Speicherkapazität als auch Kinetik negativ (Bogdanović und Schwickardi, 1997; Gross et al., 2002; Sandrock et al., 2002). Ferner ist das System auf der Tetra-Hydrid Stufe nicht vollständig reversibel. Zusammen mit der Varianz, die die Sorptionsbedingungen erlauben, ist somit die präzise Beschreibung des Systems und die zu erwartende Wasserstoffmenge herausfordernd.

Die Wasserstoffdesorption (gegen 1 bar Wasserstoffdruck) von Titan-dotiertem Natriumalanat beginnt mit der Zersetzung des Tetra-Hydrides bei ungefähr 80 °C , nimmt ab ca. 120 °C merklich an Geschwindigkeit auf und mündet in ein erstes Plateau bei ca. 150 °C

(Bogdanović und Schwickardi, 1997). Das Hexa-Hydrid ist um $10 \text{ kJ} \cdot (\text{mol H}_2)^{-1}$ stabiler als das Tetra-Hydrid und hat damit einen deutlich niedrigeren Gleichgewichtsdruck.

Typischerweise desorbiert das Hexa-Hydrid merklich um 170 °C Wasserstoff bei Desorption gegen Wasserstoff, aber erst ab 190 °C werden die Kinetik hinreichend schnell und der Gleichgewichtsdruck hinreichend hoch (Luo and Gross, 2004).

METALLHYDRID-SPEICHERSYSTEM

Die gesamte Speicherkapazität bei einem Metallhydridspeicher ergibt sich aus der sensiblen Speicherkapazität (geringer Anteil) sowie der Speicherkapazität, die aus der Reaktionsenthalpie bei der Wasserstoffsorption nutzbar wird (hoher Anteil). Als limitierender Faktor für die tatsächlich nutzbare Speicherkapazität ist jedoch die umsetzbare Leistung (Hydrierung und Dehydrierung) bei der Reaktion von Wasserstoff mit dem Metallgemisch.

Der Molstrom an Wasserstoff ist neben dem Druckgradienten auch von der Metallhydridmasse abhängig. Geringe Metallhydridmassen erlauben keinen hohen Leistungsstrom über das Wasserstoffsystem. Bei hohen Entzugsleistungen durch die gebäudetechnischen Anlagen kann der Metallhydridspeicher nicht auf Temperatur gehalten werden und es muss eine Zusatzleistung in Form einer elektrischen Nachheizung aktiviert werden.

Zur temporären Zwischenspeicherung des elementaren Wasserstoffes muss ein zweites (Speicher-)System verwendet werden. Dies kann ein Wasserstofftank, eine Wasserstoffinfrastruktur oder, wie in dieser Arbeit betrachtet, ein zweites Metallhydrid-Speichersystem sein.

Zur Kompensation großer Temperaturschwankungen und Reduktion der Zusatzenergie wurden in dieser Arbeit weitere Untersuchungen durchgeführt, die eine zusätzliche latente Speicherkapazität durch ein Phasenwechselmaterial berücksichtigen. Dieses dient dabei als Kurzzeitspeicher. Für einen effizienten Einsatz des Phasenwechselmaterials im Gesamtsystem ist die Wahl des Schmelzbereiches sehr wichtig. Zusätzlich müssen die Regelstrategie und die Wahl der Schaltwerte und Hysteresen darauf abgestimmt werden.

Die Abbildung 3 zeigt die Schichtaufbauten der in dieser Arbeit betrachteten Metallhydrid-Speichervarianten. Der Metallhydridspeicher im Gebäude wird als stehender Zylinder modelliert, der im Kern das Metallhydrid beinhaltet und mit einer Wärmedämmung ($s=150 \text{ mm}$) umschlossen wird (links oben: Basisvariante bzw. Variante 4; rechts oben: Variante 1 und 5). Die beiden Schichtaufbauten im unteren Bereich der Abbildung 3 zeigen den Schnitt eines Metallhydridspeichers mit einer PCM-Ummantelung und außenliegender Wärmedämmung (links unten:

Variante 2 und 6; rechts unten: Variante 3 und 7). Die Basisvariante besitzt eine Masse von 1300 kg Natriumalanat bei einer Kollektorfläche von 36 m² (siehe Tabelle 1). Für das NaAlH₄ mit einer Dichte von $\rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ und einer spez. Wärmekapazität von $c_p = 500 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ beträgt die Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,5 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$. Das Phasenwechselmaterial (Acetamid) besitzt in der homogenen Variante eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,2 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ und eine Dichte von $\rho = 800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Der vollständige Phasenwechsel findet in einem Temperaturbereich zwischen 70°C und 80°C statt. Dabei resultiert eine Speicherkapazität von $C \sim 260 \text{ kJ/kg}_{\text{PCM}}$.

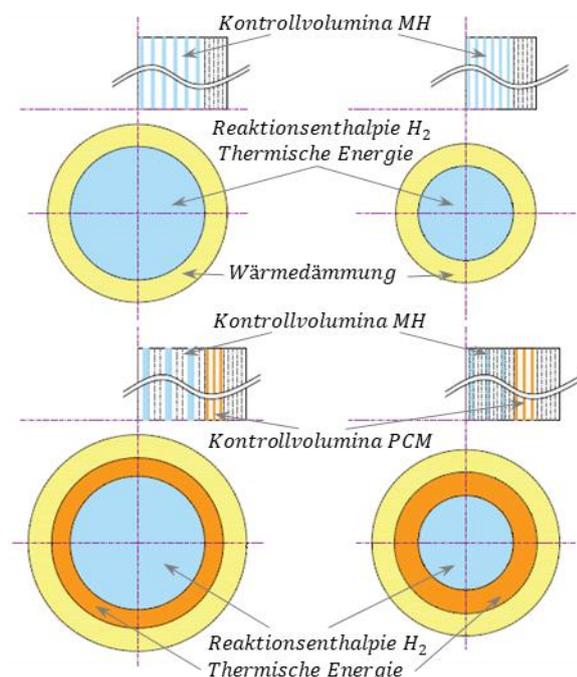


Abbildung 3: Schichtaufbau der Speichervarianten

Tabelle 1: Massen und Schichtdicken der Speichervarianten bei unterschiedlichen VR-Kollektorflächen (36 m² bzw. 18 m²)

36 m ² 18 m ²	Basis V ₄	V ₁ V ₅	V ₂ V ₆	V ₃ V ₇
m_{MH} [kg]	1300	650	1300	650
m_{PCM} [kg]	-	-	650	650
s_{MH} [mm]	450	318	450	318
s_{PCM} [mm]	-	-	124	159
Höhe [mm]	2043	2043	2043	2043

Reaktionskinetik

Die reaktionskinetischen Zustands- und Prozessgrößen (Gleichgewichtsdruck und Molstrom) werden vereinfacht durch die nachfolgenden Gleichungen beschrieben:

Der Gleichgewichtsdruck in Abhängigkeit der Temperatur ergibt sich nach:

$$p_{eq}(T) = p_0 \cdot e^{\left(\frac{\Delta H}{R \cdot T} - \frac{\Delta S}{R}\right)} \quad (3)$$

p_{eq} = Gleichgewichtsdruck; p_0 = Druckkonstante
 ΔH = Reaktionsenthalpie (Wärme); R = Gaskonstante; T = Thermodynamische Temperatur; ΔS = Änderung der Entropie.

Der Reaktionsmassenstrom ist wie folgt definiert:

$$\dot{m}_{H_2} = k_0 \cdot e^{\left(-\frac{E}{R \cdot T} \cdot \ln\left(\frac{p_{eq}(T_1)}{p_{geg}(T_2)}\right)\right)} \quad (4)$$

\dot{m}_{H_2} = Reaktionsmassenstrom H₂; k_0 = Konstante für die Reaktionsgeschwindigkeit; E = Aktivierungsenergie; p_{geg} = Gegendruck.

Der Molstrom wird berechnet über den Zusammenhang:

$$\dot{n}_{H_2} = \frac{\dot{m}_{H_2}}{M} \quad (5)$$

\dot{n}_{H_2} = Molstrom H₂; M = Molmasse.

Für den thermischen Leistungstransport über das H₂-System gilt:

$$\dot{Q} = \dot{n}_{H_2} \cdot \Delta H_{H_2} \cdot m_{MH} \quad (6)$$

\dot{Q} = thermische Leistung; m_{MH} = Masse Metallhydrid.

Zur Berechnung der dynamischen Temperaturverteilung im Metallhydridspeichersystem im Gebäude wird die instationäre Wärmeleitungsgleichung mit der Finiten Volumen Methode (FVM) diskretisiert und eindimensional die zeitliche Temperaturverteilung für das Berechnungsgebiet numerisch ermittelt. Die durch die Reaktionsenthalpie zeitlich freiwerdende bzw. abgeführte Wärmeleistung wird im Berechnungsgebiet in festgelegten Kontrollvolumina als Quellterm (Quelle bzw. Senke) berücksichtigt. Diese Vorgehensweise wurde ebenso für die Zufuhr einer Wärmeleistung durch die Solarthermieanlage bzw. für die Abfuhr einer Wärmeleistung zur Versorgung der heizungstechnischen Anlagen gewählt.

Durchgeführte Untersuchungen haben gezeigt, dass nur das AB₂-System $TiMn_{1,2}Fe_{0,37}$, welches neben anderen Materialien nur in einem Patent beschrieben ist (Gamo et al., 1980), als mögliches Material für die Wasserstoffzwischenlagerung geeignet ist. Im Gegensatz zur Modellierung des Metallhydridspeichersystems im Gebäude wird dieses Metallhydrid als homogenes Masselement ohne Temperaturgradienten betrachtet, welches sich im Erdreich außerhalb des Gebäudes befindet. Das Masselement ist mit dem Erdreich ($\lambda = 0,52 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$, $\rho = 2040 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $c_p = 1840 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$) gekoppelt, wobei der Wärmetransport im Erdreich 3-dimensional, anhand der Finiten Differenzen Methode (FDM), berechnet wird.

Zur Berechnung der Temperaturen für die Begrenzungsflächen des Erdreich-Berechnungsgebietes

wurde der Ansatz nach Kusuda und Achenbach (1965) verwendet. Mit diesem Ansatz werden die Temperaturen des ungestörten Erdreiches örtlich (3-dimensional) und zeitlich berechnet. Dabei wird lediglich die sensible Wärme in Abhängigkeit von den thermophysikalischen Eigenschaften des Erdreiches genutzt. Die latente Wärme, die ggf. durch eine mögliche Erstarrung bzw. Verflüssigung des Wassers im Erdreich vorliegt, wird im Modell nicht berücksichtigt.

Wie bei den Titan-basierten AB-Systemen lagern auch die Ti-basierten AB_2 -Systeme Wasserstoffatome auf Zwischengitterplätze ein und gehören damit ebenso zur Klasse der interstitiellen Metallhydride. Die Desorptionenthalpie wird im Patent von Gamo et al. (1980) nicht genannt, sondern lediglich eine Konzentrations-Druck-Isotherme (KDI) bei 10°C und die reversible Wasserstoff-Speicherkapazität von $1,5\text{ m\% H}_2$. Die Desorptionenthalpie musste daher über die van 't Hoff Gleichung und repräsentative Werte für das ΔS interstitieller Metallhydride von $(114\text{ J}\cdot(\text{mol K})^{-1})$ geschätzt auf ca. $27,1\text{ kJ}\cdot(\text{mol H}_2)^{-1}$ werden. Weiters muss die geringere reversible Wasserstoff-Speicherkapazität bei dem AB_2 -System durch Erhöhung der Masse kompensiert werden.

Das Natriumalanat ermöglicht unter den festgelegten Prozessbedingungen eine reversible Wasserstoff-Speicherkapazität von ungefähr $2,23\text{ m\% H}_2$. Somit wäre eine Verdoppelung der Masse des AB_2 -Systems ausreichend, womit jedoch noch nicht berücksichtigt ist, dass der geringere Molstrom je kg Metallhydrid am AB_2 -System einen weiteren limitierenden Faktor darstellt und dadurch eine Verdreifachung der Masse des AB_2 -Systems erforderlich ist.

Anhand der Literaturdaten wurde für das Metallhydrid $TiMn_{1,2}Fe_{0,37}$ eine Dichte von $\rho = 1000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ und eine spez. Wärmekapazität von $c_p = 1000\text{ J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$ festgelegt.

HYDRAULIKKONZEPT UND REGULINGSSTRATEGIE

Die hydraulische Anlage besteht aus den Bereichen Wärmebereitstellung, Wärmespeicherung (Metallhydridspeicher und Warmwasserspeicher), hydraulische Regelgruppen mit Nachheizelementen, den Umschaltventilen sowie den Wärmeabgabesystemen (Fußbodenheizung sowie einem Nachheizregister für die Lüftungsanlage). In Abbildung 4 wird die hydraulische Verschaltung dargestellt.

Die Basis-Regelstrategie sieht vor, dass der direkten Warmwasserbereitung mittels unterem Heizregister im Falle einer solaren Einstrahlung auf das Kollektorfeld die höchste Priorität zugeteilt wird. Die Umwälzpumpe (UWP) im Kollektorkreislauf wird aktiviert, wenn die Kollektorvorlauftemperatur um ein definiertes $\Delta\theta$ höher ist als die Sensortemperatur (TE) im unteren Speicherbereich.

Durch die stetige Anpassung des Massenstromes wird die Volatilität der solaren Strahlungsintensität berücksichtigt und ein ständiges Ein- und Ausschalten der UWP reduziert. Im Falle einer Beladung des Warmwasserspeichers durch die Solarthermieanlage wird die Beladung mittels oberem Heizregister des Warmwasserspeichers gesperrt. Dieses ermöglicht eine Warmwasserbereitung mit Wärme aus dem Metallhydridspeicher.

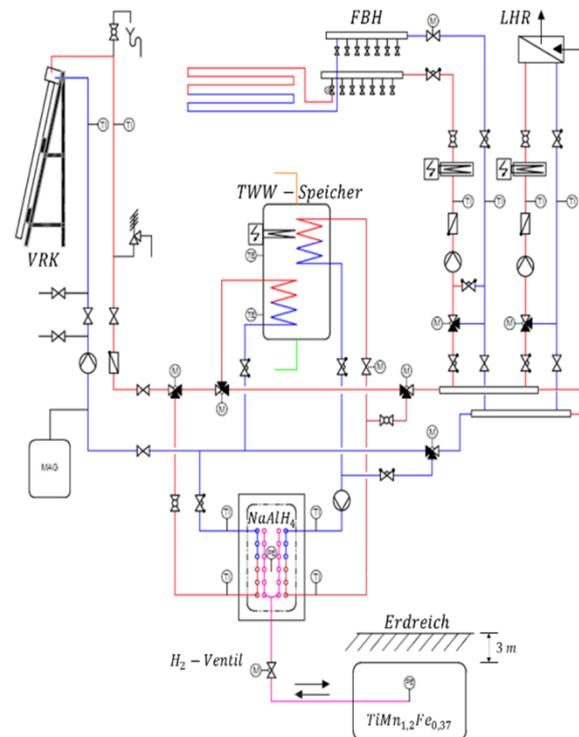


Abbildung 4: Vereinfachte schematische Darstellung der Komponenten und der Anlagenhydraulik

Die elektrische Nachheizung für die Warmwasserbereitung erfolgt unmittelbar im oberen Bereich des Warmwasserspeichers. Diese wird aktiviert, wenn die Speichertemperatur im oberen Drittel unter 50°C abfällt, und wird abgeschaltet, wenn 55°C im oberen Bereich des Speichers erreicht bzw. überschritten werden.

Die nächste Prioritätsstufe berücksichtigt die direkte Nutzung der solaren Wärmeenergie für die Fußbodenheizung und das Luftheizregister mit einem Mindesttemperaturniveau von 45°C auf der Primärseite (Heizkreisverteiler). Eine doppelte Beimischschaltung stellt sicher, dass ein Temperaturniveau von max. 35°C für die Fußbodenheizung auf der Sekundärseite (Wärmeabgabeseite), unter Ausnutzung des gesamten Hubbereiches des Regelventiles, zur Verfügung gestellt werden kann. Der Massenstrom durch das Kollektorfeld resultiert aus der Summe der primären Massensströme (FBH und LHR), wobei eine Mindesttemperatur von 45°C am Kollektorfeld gegeben sein muss. Sinkt die Temperatur im Metallhydridspeicher unter 46°C und die Solarthermieanlage

kann bei dem notwendigen Massenstrom eine Temperatur von 45 °C nicht bereitstellen, wird für das LHR auf der Sekundärseite (Wärmeabgabe) der Regelgruppe eine elektrische Nachheizung aktiviert, um das Fluid auf 45°C zu erwärmen. In diesem Fall wird durch das Stellglied das Regeltor geschlossen, um eine Erwärmung des Metallhydridspeichers über die Rücklaufleitung durch die elektrische Nachheizung zu verhindern. Für die Vorlauftemperatur der FBH gilt dasselbe mit dem Unterschied, dass die elektrische Nachheizung nur eine Temperatur von 35°C gewährleisten muss.

SIMULATIONSERGEBNISSE

Die Simulationsvarianten werden nachfolgend anhand des solaren Deckungsgrades (Glg. 7) miteinander verglichen.

$$SD = 1 - \frac{\sum_0^{8760} Q_{Nachheizung}}{\sum_0^{8760} Q_{Nutzges}} \quad (7)$$

Aus den ersten Simulationsergebnissen konnte die Erkenntnis gewonnen werden, dass das grundlegende Ziel einer übersaisonalen Wärmespeicherung auch unter Verwendung eines Metallhydridspeichersystems zu sehr großen Metallhydridmassen führt. Mit der Verwendung von $NaAlH_4$ als Metallhydrid, welches eine Schüttdichte von $\rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ besitzt, ergibt sich für den autarken Betrieb ein sehr großes Reaktorvolumen und somit auch ein großer Platzbedarf. Die Gründe dafür sind, neben der limitierten reversiblen Wasserstoffmenge, die gedämpfte Wasserstoff-Reaktionskinetik im $TiMn_{1,2}Fe_{0,37}$ während der kalten Jahreszeit und hohe thermische Lastspitzen. Die maximal mögliche reversible Wasserstoffmenge hängt von der Metallhydridmasse und den Betriebsrandbedingungen ab. Die Simulationsergebnisse haben gezeigt, dass mit Zunahme der Metallhydridmasse eine Zunahme der Abweichung zur reversiblen Wasserstoffmenge gegeben ist. Das bedeutet, dass die mögliche Speicherkapazität nie vollständig ausgenutzt wurde. Einzig bei einer Metallhydridmasse von 1300 kg $NaAlH_4$ konnte unter optimalen Betriebsbedingungen und einer Regeneration des Erdreiches im Bereich des Metallhydridspeichers die maximale reversible Wasserstoffmenge im dynamischen Jahresverlauf erreicht und somit die maximal mögliche Speicherkapazität des Metallhydridspeichers genutzt werden.

Mit einer Kollektorfläche von 36 m² und einem 1300 kg Metallhydridspeicher im Gebäude (Basisvariante) lässt sich ein solarer Deckungsgrad für die Wärmeversorgung von ~ 72 % erreichen. Wird die Metallhydridmasse um 50 % reduziert (Variante 1), verringert sich der solare Deckungsgrad um ~ 7 %. Die gesamte elektrische Nachheizenergie steigt dabei um rund 25 % an. Eine zusätzliche PCM-Speichermasse von 650 kg (Variante 2) verringert die

gesamte elektrische Nachheizenergie um ~ 51 % und erhöht den solaren Deckungsgrad um rund 15 %. Bei der Umsetzung der Variante 3 reduziert sich der solare Deckungsgrad lediglich um ~ 5 % gegenüber der Variante 2.

Abbildung 5 zeigt die Änderung der Nachheizenergie für die untersuchten Metallhydrid-Speichervarianten bei einer Kollektorfläche (Aperturflächen) mit 36 m² und einer Kollektorfläche von 18 m². Wie erwartet kommt es zu einer Zunahme der Nachheizenergie mit einer Kollektorfläche von 18 m², Varianten (V4 bis V7). Dadurch wird der solare Deckungsgrad verringert. Wird beispielsweise die Variante 6 betrachtet, so zeigt sich, dass die Zusatzenergie nur geringfügig erhöht wird und der solare Deckungsgrad nur um rund 3 % gegenüber der Basisvariante vermindert wird.

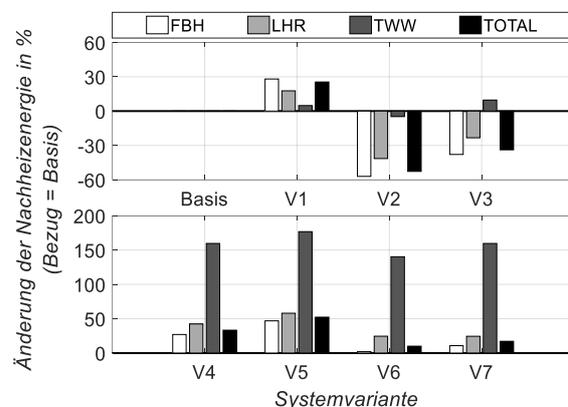


Abbildung 5: Änderung der Nachheizenergie für die Metallhydrid-Speichervarianten (oben: 36m² VR-Kollektorfläche, Basis, V1, V2, V3; unten: 18m² VR-Kollektorfläche, V4, V5, V6, V7)

ZUSAMMENFASSUNG

Die durchgeführten Untersuchungen auf Basis dynamischer Gebäude- und Anlagensimulationen stellen prinzipiell das Systemverhalten und die Wechselwirkungen zwischen Heizwärmebedarf, Wärmebereitstellung und Systemverhalten des Wärmespeicherkonzepts mittels Metallhydriden in Abhängigkeit von festgelegten Randbedingungen dar.

Es ist von besonderer Bedeutung, eine Abstimmung aller Systemkomponenten wie Regelung (Regelstrategie), Speichermaterialien (z.B. $NaAlH_4$, $TiMn_{1,2}Fe_{0,37}$, PCM-Material (Acetamid)) und Speichermassen für ein funktionierendes System vorzunehmen. Prinzipiell ergeben sich mit den betrachteten Metallhydridmassen hohe Speicherkapazitäten (bei 1300 kg $NaAlH_4$ rund 154 kWh bei einem $\Delta\theta = 30 \text{ K}$).

Die Auswertung der Simulationsergebnisse zeigt jedoch, dass die theoretische Speicherkapazität bei dem betrachteten Metallhydrid nicht vollständig bzw. kurzfristig nutzbar gemacht werden kann. Die Ursachen liegen in der limitierten thermischen Leistung durch die Solarthermiekollektoren und in der gedämpften Wasserstoff-Reaktionskinetik aufgrund der

geringen Temperaturen im Erdreich-Metallhydrid. Die Temperatur im NaAlH_4 fällt bei hohen thermischen Entzugsleistungen für die Raumwärmebereitstellung sehr rasch ab. Geringe Druckgradienten im Wasserstoffsystem (aufgrund der geringen Temperatur des Metallhydrids im Erdreich während der Heizperiode) limitieren die Reaktionskinetik und somit den sorptiven Leistungseintrag in das Metallhydrid. Auf Grund dessen muss die elektrische Zusatzheizung aktiviert werden.

In diesem Zusammenhang würde eine Lastlimitierung bzw. eine Lastverschiebung bei den Wärmeabgabesystemen eine Verbesserung der Metallhydrid-Speichernutzung ergeben. Die Anwendung eines Phasenwechselmaterials zur Dämpfung hoher Leistungsspitzen und Verwendung als Kurzzeitspeicher, hat sich bei der Auswertung der Simulationsergebnisse als sehr positiv herausgestellt. Die erforderliche elektrische Nachheizenergie lässt sich mit einer zusätzlichen Masse von 650 kg Acetamid bei einem 1300 kg NaAlH_4 Metallhydridspeicher und einer 36 m² VR-Kollektorfläche um rund 50 % verringern. Damit dies jedoch auch in der praktischen Umsetzung möglich wird, ist auf die Wärmeübertragung vom Wärmeerfluid an das PCM und umgekehrt ein besonderes Augenmerk zu legen.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass ein Wärmespeicherkonzept auf Metallhydridbasis im Prinzip funktionstauglich ist, aufgrund der eher eingeschränkten Reaktionskinetik der untersuchten Metallhydride (vergleichsweise niedrige Erdreichtemperaturen im Winter) fällt dieses Speicherkonzept jedoch weitaus komplexer und umfangreicher aus als herkömmliche gebäudetechnische Anlagen.

DANKSAGUNG



Dieses Projekt wurde vom Klima- und Energiefond finanziert und im Rahmen des Forschungsprogrammes „Energieforschung (e!MISSION)“ durchgeführt.

LITERATUR

BMLFUW. 2017. Erneuerbare Energie in Zahlen 2016 – Entwicklung in Österreich – Datenbasis 2015, Informationsbroschüre, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Stubenring 1, 1010 Wien, bmlfuw.gv.at, aufgerufen unter: <https://www.klimaaktiv.at/dam/jcr:36c97be8-f705-483b-be86-e71e89e109c3/Erneuerbare%20Energie%20in%20Zahlen%202016%20auf%20Datenbasis%202015.pdf>

Bogdanović, B., Schwickardi, M. 1997. Ti-doped alkali metal aluminium hydrides as potential novel reversible hydrogen storage materials. *J. Alloys Compd.* 253–254, 1–9. doi:10.1016/S0925-8388(96)03049-6

Chotivisarut N., Kiatsiriroat T. and Aye L. 2009. “Design of central solar heating with underground seasonal storage in Australia”, *Asian Journal on Energy and Environment*, vol. 10, issue 1, pp. 28 – 34

Dongellinia M., Falcionia St. and Morinia G. L. 2015. “Dynamic simulation of solar thermal collectors for domestic hot water production”, *ATI 2015 - 70th Conference of the ATI Engineering Association, Energy Procedia*, vol. 82, pp. 630 – 636

Fuller R. and Aye L. 2007. “Seasonal storage for solar thermal systems in Australia?”, in *Is Solar our only Nuclearoption?*, ANZSES Solar 07

Gamo, T., Moriwaki, Y., Yamashita, T., Fukuda, M. (1980) Hydrogen storage material, US Patent 4195989, Herausgeber: Google Patents, aufgerufen am 02.06.2016 unter: <https://www.google.ch/patents/US4195989>

Gross, K.J., Thomas, G.J., Jensen, C.M. 2002. Catalyzed alanates for hydrogen storage. *J. Alloys Compd.* 330–332, 683–690. doi:10.1016/S0925-8388(01)01586-9

Kusuda T., Achenbach P. R. 1965. Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the United States, Summary of Research Report 8972, National Bureau of Standards Building Research Division, Washington, D.C.

Luo, W., Gross, K.J. 2004. A kinetics model of hydrogen absorption and desorption in Ti-doped NaAlH_4 . *J. Alloys Compd.* 385, 224–231. doi:10.1016/j.jallcom.2004.05.004

Sandrock G. 1997. State-of-the-art Review of Hydrogen Storage in Reversible Metal Hydrides for Military Fuel Cell Applications, Department of the Navy, Office of Naval Research, NTIS Report # AD-A328073/2INZ

Sandrock, G., Gross, K., Thomas, G., Jensen, C., Meeker, D., Takara, S. 2002. Engineering considerations in the use of catalyzed sodium alanates for hydrogen storage. *J. Alloys Compd.* 330–332, 696–701. doi:10.1016/S0925-8388-(01)01505-5

IX: Light and shading

EXPLORING THE POTENTIAL OF DYNAMIC FACADE SYSTEMS: AN EXTERIOR SHADING SYSTEM VERSUS A SWITCHABLE WINDOW

A. Ganji Kheybari¹ and S. Hoffmann¹

¹The Chair of Built Environment, TU Kaiserslautern, Germany

ABSTRACT

Dynamic façade systems can play an important role in the overall performance of the building by adjusting the amount of transmitted solar radiation into the room and responding to environmental conditions. This paper evaluates two types of dynamic facade systems under various control strategies and shows their influences on energy, visual comfort, and thermal comfort in an office building.

This paper looks into the simulated hourly/annual results of venetian blinds versus electrochromic glazing (EC) for an open office room with south-facing window shaded/operated by different control strategies such as manual, radiation-based, illuminance-based, and optimal control scenario, to indicate the overall capabilities and limitations of each shading system.

Finally, results show that a well-engineered automatic control strategy can ensure visual and thermal comfort as well as total site energy savings up to 38% for an EC glazing and up to 49% for external venetian blinds.

INTRODUCTION

Buildings are responsible for a significant portion of total global energy consumption and windows have the most important impact on the energy balance of buildings. By harvesting solar gains, a considerable part of heating demand can be covered in cold winters. Moreover, by using external shading and blocking the sunlight, cooling demand and risk of overheating can be reduced up to 57% (Nikoofard et al. 2014). But protection from disturbing glare in winter decreases the expected solar gains and the reduction of the solar transmittance mostly comes at the cost of poorer daylighting and view obstruction. This makes the control of a dynamic façade system very complex since people prefer windows to provide daylight and view to the outside (Inoue et al. 1985).

Automated venetian blinds can play an important role in the overall performance of the building by redirecting solar radiation. Electrochromic (EC) windows are also capable of adjusting the amount of

transmitted solar radiation into the room and responding to environmental conditions. By adjusting incident solar heat flux entering the building, dynamic shadings can improve building energy efficiency significantly for south, west, and east oriented glazed facades (from 8% to 53% for Quebec, Canada), but unremarkably for the north facade (Dussault et al. 2012)

In addition to the orientation, the performance of dynamic shadings highly depends on the control strategy for automation. Precedent experimental studies showed that automated venetian blinds could save 7–15% cooling energy and 19–52% lighting energy in comparison to a fixed shading (45° tilted) (Lee et al. 1998 & 2002; Roche, 2002).

Despite all the benefits, many post-occupancy studies reported occupants' dissatisfaction with automated systems (Inkarojrit, 2005). Inkarojrit tried to categorize influential factors that lead to the dissatisfactory performance of an automated shading. It should be noted that besides all signs of progress in high-performance systems and attempts to solve the occupants' dissatisfaction problem, even the most promising control strategies are still limited to one or a small number of sensor-based variables among the separated physical factors (e.g. irradiance, illuminance). Only a few predictive control methods can consider some contextual factors and physiological individual preferences (Dussault et al. 2012; Motamed et al. 2020).

Automated dynamic shadings

Conventional control strategies are mostly incapable of considering multiple variables and all the necessary aspects of energy and comfort required for the selection of the right shading state.

Different rule-based strategies have been applied for windows commonly based on predefined conditions (e.g., "if... then..."). The algorithm switches the state of the shading in response to the difference between measured/simulated and set-point values. Many single variables such as indoor temperature, glare, the illuminance at the workplace and radiation level have been used in precedent studies, while there is only limited research with multiple variable rule-based strategies (Dussault et al. 2012; Firlaç et

al. 2015; Dutta, 2018). Radiation-based control is one of the most used strategies which activates the shading when the single variable of global radiation on vertical façade is greater than 200W/m^2 (DIN 4108-2) or direct radiation falling on the workplace is greater than 50W/m^2 (Reinhart, 2004).

These algorithms mainly use only two states of the shading system (shaded or not-shaded) applied on the entire opening area without considering the height of pulled down blinds or zoning of tinted EC. Daylighting, perception of discomfort glare for individual view directions, and individual thermal comfort is not directly taken into account in these strategies and are mostly overlooked. Improved strategies block the solar transmittance by using multiple shading states (different tilting angles for blinds and different tinting states for EC). The so-called “cut-off” controller avoids diminishing daylighting by adjusting the slat angle of the lamellas according to the actual position of the sun to block the direct sunlight while admitting the diffused part of radiation in the room (Bueno et al. 2015).

Another type of control strategy that gained a lot of interest in the past few years in building applications is Model Predictive Control (MPC) (Dussault et al. 2012). MPC is a type of control algorithm that uses an explicit model of a building to predict its condition over a defined time horizon. At each control time step, the MPC minimizes the cost function (including electricity and discomfort) assuming weather forecast and occupation forecast.

Even though the performance of these predictive algorithms sounds very promising (Gehbauer et al. 2020), setting up a predictive model and calibration process requires extensive skills and knowledge, while the same model is not fully compatible for new conditions (new orientation, room geometry, plan lay-out, ...).

Simulation/optimization methods

Available methods/tools for simulation/optimization are incapable of finding the optimal control strategies for application in real buildings. The interaction of the fenestration systems with daylighting, thermal inertia, and HVAC systems is one of the major challenges in simulations and applications. Therefore, investigating the potential of different automated shading systems and control strategies is only possible through a multi-objective approach and considering advanced integrated daylight and thermal simulations (e.g. using BSDF data sets).

By using a weighted penalty function method introduced by authors (Ganji & Hoffmann, 2018 & 2019), this paper evaluates different control strategies for dynamic facade systems and their influence on energy and visual comfort, thermal comfort performance in office buildings. The

“optimal scenario”, a time series of EC glazing or venetian blinds states over a year were found based on some predefined preferences and priorities. Moreover, the overall performance of shading systems was also compared under various control strategies.

METHODOLOGY

In this paper, advanced simulation methods of integrated daylight and energy simulation were used for an open office room (shared by four users) with a south-facing window. South-facing façade is the most ideal orientation, particularly for an office building, to have commonly large openings where proper shading can increase the potential for energy saving, provide comfort, and keep enough view outside.

Later, this paper looks into the annual/hourly performance of venetian blinds versus electrochromic glazing under different control strategies to understand the behavior of the systems and use this knowledge for finding the investment potential in dynamic shadings and advanced control strategies.

Model description and simulation setup

The reference model represents a typical open office room with a window divided into three different zones (top, middle, bottom). Figure 1 shows the room geometry and the layout of four workplaces.

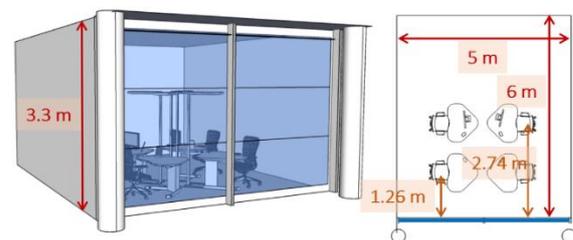


Figure 1: left) 3D model with different window zones (top, middle, bottom), right) the layout of occupants' position in the open office

Verified simulation tools including TRNSYS for energy simulation, Radiance for daylight simulation, and LBNL Window for modeling the glazing and shading systems were used in this study. These tools are all empowered with the BSDF (Bidirectional Scattering Distribution Functions) for the advance calculation of transmitted radiation through complex fenestration systems.

The glazing systems were modeled in LBNL window software (www.windows.lbl.gov) and prepared to be used in Radiance and TRNSYS (via trnBSDF tool) (McDowell et al. 2017). Table 1 shows the overall performance of the glazing and shading systems including solar heat gain coefficient (SHGC), solar transmittance (T_{sol}), and visible transmittance (T_{vis}) calculated using LBNL Window (v 7.6).

Table 1: Overall performance of glazing and shading

EC glazing	SHGC	T _{sol}	T _{vis}	Shading state
Clear state	0.43	0.29	0.44	S0
Low tinted	0.21	0.07	0.12	S1
Middle tinted	0.16	0.02	0.04	S2
Fully tinted	0.14	0.004	0.007	S3
Venetian blinds	SHGC	T _{sol}	T _{vis}	Shading state
Pulled up* (base-case)	0.61	0.42	0.58	S0
Horizontal: 0°	0.52	0.35	0.48	S1
30°	0.29	0.18	0.25	S2
45°	0.16	0.01	0.13	S3
Closed: 80°	0.03	0.003	0.005	S4

* This window state represents a conventional double glazed window which was used as base-case in this study.

For modeling the exterior blinds, Radiance base tool genBSDF was used to generate the BSDF data sets for each state of the shading. These data sets were combined with the glazing systems (pulled up) in the Window software again. These modeling methods were explained in detail by authors for electrochromic glazing (Ganji & Hoffmann, 2019) and venetian blinds (Ganji & Hoffmann, 2018).

It is worth mentioning that the clear EC glazing (bleached) is less transparent than the clear base-case window (SHGC delta 0.18). Also, fully closed blinds with 80° tilting angle have lower solar heat gain coefficient than fully tinted EC glazing (SHGC delta 0.11), which leads to better solar protection during summer when the use of fully closed shading is needed, particularly for optimal control profile (CtrlOpt).

In this study, the window with no shade (Venetian blinds Pulled up) represents a conventional double glazed window which was used as base-case.

In the next step, the optical properties of the glazing and shading system were applied to the window surface (top, middle, bottom) of the reference room as BSDF data-set (xml format) for every state of shading/tinting. For climate-based annual daylight simulation Radiance three-phase method (Ward & Shakespeare, 2004 & McNeil et al. 2013) was used.

Energy simulation using the “detailed” window model was performed in TRNSYS (v. 18) (Hiller & Schöttl, 2014). Using variable configuration ID (shading states), optical and thermal properties of a window can be adjusted at every time step during TRNSYS simulation.

The daylight availability which was simulated earlier in Radiance for each window combination of EC and venetian blinds (64 and 13 cases respectively) was read to control artificial lighting. Knowing the current state of the window(s) during simulation, corresponding daylight values were read in TRNSYS to calculate the electrical power for supplemental artificial lighting and taking into account that amount of energy as internal gain.

Tables 2 and 3 show the construction properties of the surfaces and some boundary conditions used in simulations.

Table 2: Properties of surfaces in simulations

Construction	Area [m ²]	Thickness [m]	U-Value [W/m ² .K]	Thermal Category	Reflectivity
Floor	30	0.42	0.22	Boundary	0.25
Ceiling	30	0.31	0.58	Boundary	0.9
Int. Wall	36.3	0.13	0.32	Boundary	0.8
Ext. Wall	22.3	0.41	0.19	External	0.8
Overhang	-	-	-	Dummy	0.55
Window (notshaded)	14	0.036	Blind:1.37 EC:1.3	External	BSDF Data sets

Table 3: Dynamic simulation setup & description

Item	Description	
Room geometry	6 m length, 5 m width, and 3.3 m height WWR: 90%	Rhino 3D model
Weather data	49.48° N, 8.46° E (Mannheim, Germany)	.epw file
Schedule	Mon to Fri 8:00-18:00 Sat & Sun Off	office
Internal gains	4 People, light work 4 Computers 2 groups of LED lighting (5 W/m ²)	daylight base control 300-500lx
Infiltration	Unoccupied: n = 0.1 [h ⁻¹] Occupied: n = 1.45 [h ⁻¹]	
Heating Cooling	H_Set-point = 20°C C_Set-point = 27°C	Ideal systems
PMV calculation parameters	Clothing factor: 1 [clo] Metabolic rate: 1 [met] Air velocity: 0.1 [m/s]	Internal calculation in TRNSYS

Control strategies applied in simulations

In this paper, six different control conditions were defined and applied for both electrochromic glazing and external shading simulations.

By applying these control profiles including two static cases (not-controlled), one manual operation, and three dynamic cases (automatic control algorithms) in simulations, the annual energy and comfort performance of an open office room with a south-facing window was simulated for comparison.

Static facade without any control: Indicates the impact of using an automated shading system, these two control cases were used in this study as baseline energy consumption. **No-shade (CtrlClr):** the EC glazing is always in clear state and the blinds are completely pulled up. An office room with “CtrlClr” has minimal heating demand and electrical lighting use. **Always-shaded (CtrlDrk):** the EC glazing is always in a fully tinted state and the blinds are completely pulled down and closed (tilted 80° outward). An office room with “CtrlDrk” has minimal cooling demand, risk of glare, and thermal discomfort.

Manual operation (CtrlMan): Users tend to avoid the direct sunlight on the workplace, but it remains pulled down/tinted until the lunch-time break or next morning upon arrival. Also, occupants may accept intensive irradiance if that gives them a good view outside. The manual control of the shading device has been implemented for blinds and EC similar to the algorithm described by Reinhart (Reinhart, 2004). For low solar altitude angle ($\leq 60^\circ$), a user activates the shading, if a specific set point for the radiation, illuminance, or glare is exceeded (e.g. $I_{dir} \geq 50 \text{ W/m}^2$, $E_h \geq 3000 \text{ lx}$, and $DGP \geq 0.38$). While when the solar altitude angle is high ($> 60^\circ$), the sun is not directly visible to the eyes and users would prefer to keep the view outside unobstructed.

The manual operation was considered in the study to compare it to automatic algorithms.

Automatic rule-based control: The state of the shading system switches in response to the difference between simulated and set-point values of illuminance or radiation:

Illuminance-base control (CtrlIll) checks the amount of available daylight on the horizontal workplaces (horizontal illuminance, E_h) and changes the EC glazing and venetian blinds regarding the predefined conditions. Normally, the range between 300 [lx] and 3000 [lx] is considered as useful daylighting. When E_h is greater than 3000 [lx] there is a high risk of glare or overheating in the space. E_h lower than 300 [lx] is considered as “not enough daylight” and artificial lighting needs to be applied to provide sufficient lighting level on the workplaces during the occupied hours.

In previous studies, a wide range of various global and direct irradiance thresholds have been applied (150-400 [W/m²] and 20-100 [W/m²] respectively) for controlling EC systems. In this study, **Radiation-based control (CtrlRad)** checks the amount of direct radiation on the window surface and activates the EC glazing and venetian blinds accordingly when the direct radiation on the vertical façade is greater than 50 [W/m²]. Both radiation-based control (CtrlRad) and illuminance-based control (CtrlIll) are sensor-based controllers that have been used commonly in buildings for automating shading systems.

To avoid infeasible cases (all window areas in fully-shaded state) and providing minimum daylighting, the bottom zone of the window was kept always clear for both “CtrlIll” and “CtrlRad”.

In the conclusion section, we only compare the results of radiation-based control (CtrlRad) with other types of control strategies for the sake of simplicity.

Optimal automatic control scenario (CtrlOpt)

A “simulation-based optimization” that has been introduced by the authors is used in this study to explore different possible control profiles for shading states. According to the predefined priorities for energy, visual comfort, and thermal comfort, an “optimal” scenario can be generated by exploring pre-calculated hourly results for all possible window combinations to find the top-ranked (optimal hourly) states with minimum penalties (Ganji 2019 & 2018).

Applying the “optimal” scenario in simulation can provide minimum energy demand and maximum thermal and visual comfort over the course of a year as it was prioritized by users. These priorities may vary from one project to the other and should be defined in advance, whether the main objective is e.g. saving energy or providing comfort. Previously the authors have investigated different weighting fractions (ω_i) for each aspect of visual comfort, thermal comfort, and energy (Ganji 2019 & 2018). However, in this paper, the weighting fractions (see Table 4) were decided equally with the same priority in the total penalty function (Equation. 1 & 2). Meaning, the results should show a good trade-off between energy savings and thermal and visual comfort provision.

$$\text{Penalty}_{\text{total}} = \sum \omega_i \times P_i \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Penalty}_{\text{total}} = & (\omega_1 \times P_{\text{dgp}} + \omega_2 \times P_{\text{daylight}} + \omega_3 \times P_{\text{art.light}} \\ & + \omega_4 \times P_{\text{pmv}} \\ & + \omega_5 \times P_{\text{energy}}) \quad (2) \end{aligned}$$

Table 4: Weighting fractions used in penalty function for optimal control (CtrlOpt)

Discomfort glare	Daylight quality	Artificial lighting	Thermal comfort	Energy
ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5
0.11	0.11	0.11	0.33	0.33

Table 5 summarizes different control strategies and their criteria for controlling electrochromic glazing (EC) and external venetian blinds.

Table 5: Various control strategies

Ctrl strategies	Condition	Shading state ID [Top, Middle, Bottom]	
		EC state	Blinds state
Static			
CtrlClr	Fixed not-shaded	[0,0,0] Clear	[0,0,0] Up
CtrlDrk	Fixed shaded	[3,3,3] Fully tinted	[4,4,4] 80° tilted
Dynamic			
CtrlMan	$I_{dir} < 25 \text{ W/m}^2$	[0,0,0]	[0,0,0]
	$I_{dir} \geq 50 \text{ W/m}^2$ alt $\leq 60^\circ$	[3,3,0] Fully tinted	[4,4,0] 80° tilted
	$I_{dir} \geq 50 \text{ W/m}^2$ alt $> 60^\circ$	[2,0,2] Low tinted	[2,2,0] 30° tilted
CtrlIll	$E_h < 300 \text{ lx}$	[0,0,0]	[0,0,0]
	$300 \leq E_h < 3000$	[2,2,0] Low tinted	[1,1,0] 0° tilted
	$E_h \geq 3000 \text{ lx}$	[3,3,0] Fully tinted	[3,3,0] 45° tilted
CtrlRad	$I_{dir} < 50 \text{ W/m}^2$	[0,0,0]	[0,0,0]
	$I_{dir} \geq 50 \text{ W/m}^2$	[2,2,0] Low tinted	[3,3,0] 45° tilted
CtrlOpt	Optimal scenario: Penalty function-based algorithm	[var., var., var.] 0,1,2, or 3	[var., var., var.] 0,1,2,3, or 4
		All aspects with same weighting fraction	

ANALYSIS OF THE RESULTS

This paper evaluates the overall performance of a building with a switchable window (EC glazing) versus external venetian blinds in the following three aspects: energy, visual comfort, and thermal comfort. The hourly results of the simulations for different control strategies were evaluated and compared using the following overall parameter:

- Percentage of occupied hours with visual discomfort, including discomfort glare and not useful daylight
- Percentage of occupied hours with thermal discomfort
- Total energy consumption (site, source energy, and equivalent CO₂ emission)
- Percentage of occupied hours with retracted shades or tinted glazing

Performance indicators

Based on the hourly simulated results (8760 values for each case), some overall performance indices and their acceptance criteria were defined to be used for the evaluation process.

Glare: To predict glare experience, the enhanced simplified method was implemented by simulating vertical eye illuminance (E_v) and rendering fisheye HDR images (when a direct sunray hits the observer's eye) (Wienold et al. 2004) for every view direction (at 120 cm height) and window combination in Radiance. For a complete year, the percentage of occupied hours when DGP value(s) exceeded the threshold (here is 0.4) is calculated as DGP_e. This annual parameter is recommended to be kept below 5% for a “good-class” glare protection (DIN EN 17037:2019). Since the office was shared between four users with different view directions, in this study when any individual's DGP value went above 0.4, that occupied hour was assumed with discomfort glare probability (maximum hourly DGP).

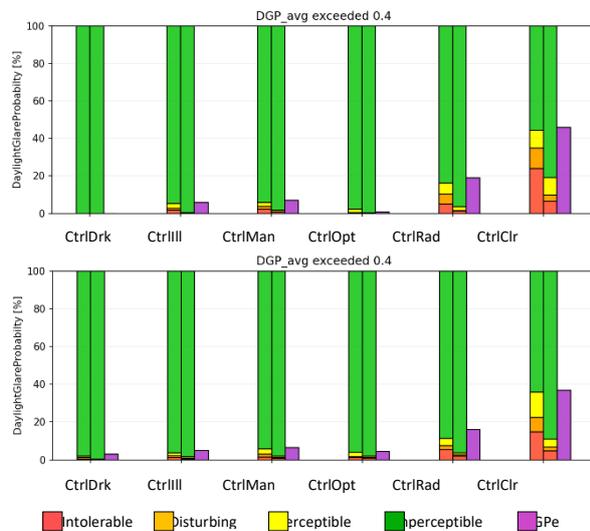


Figure 2: The overall performance of the systems for glare protection, top: blinds, bottom: EC

Figure 2 (also see Table A-1 and B-1 in Appendix) shows the overall results of glare probability as a triple color-coded bar for each control case (green: imperceptible, yellow: perceptible, orange: disturbing, and red: intolerable). For each control case, the left bar shows glare for the two users sitting closer to the window (G1) and the middle bar shows the results for the other two users positioned farther away from the façade (G2). The right bar shows the exceeded values, DGP_e (purple).

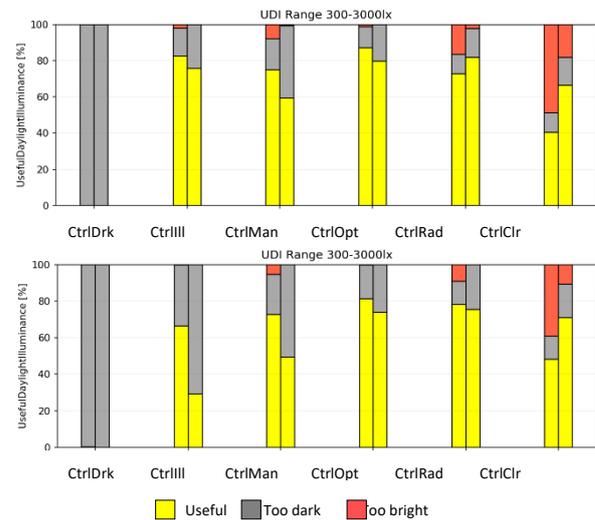


Figure 3: The overall performance of the systems for daylighting, top: blinds, bottom: EC

Available daylight: Since there is a significant risk of glare or overheating when the illuminance values on the workplace are above 3000 [lx], the hourly horizontal illuminance (E_h) for all four workplaces was simulated at the height of 75 cm above the floor. Useful Daylight Illuminance (UDI) is the percentage of occupied hours when the average E_h lies in the range between 300 [lx] and 3000 [lx] (Nabil & Mardaljevic 2005). This annual parameter shows how much daylight can be available by applying dynamic shading for a complete year.

Figure 3 (also see Table A-1 and B-1 in Appendix) shows the overall results of UDI percentage as a double color-coded bar for each case (red: too bright ($E_h \geq 3000$), gray: too dark ($E_h < 300$), and yellow: useful daylight) for groups G1 and G2.

Thermal comfort: Assuming that a satisfying thermal condition (feeling neutral) can be achieved when the predicted mean vote temperature (PMV) stays between -1 and +1 (ASHRAE 55: Class IV), simulated hourly results of individual local PMV (based on users' position) from TRNSYS were post-processed over a complete year.

Figure 4 (also see Table A-2 and B-2 in Appendix) shows the overall percentage of occupied hours with thermal discomfort when PMV value lies below -1 (blue: cold) or above +1 (red: warm) for groups G1 and G2.

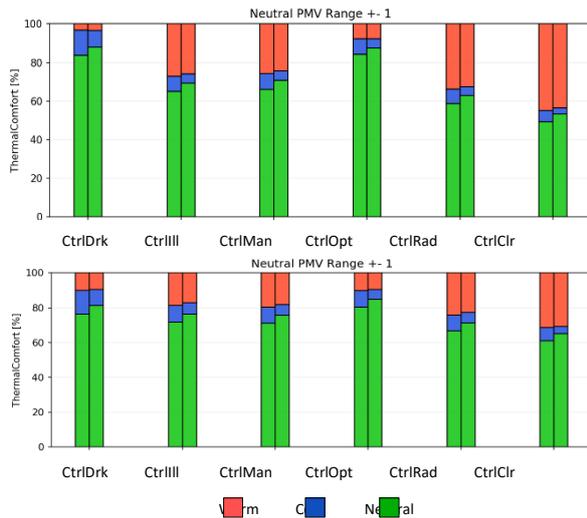


Figure 4: The overall performance of the systems for thermal comfort, top: blinds, bottom: EC

Energy and carbon footprint: Based on the set-point temperatures assigned in thermal simulation for the ideal heating and cooling (respectively 20°C and 27°C and later 21°C and 25°C), hourly energy demands for heating and cooling were simulated. This dead-band was defined quite loose in order to magnify the impact of shading systems. Later, the second dead-band was applied for heating and cooling systems (respectively 21°C and 25°C) to provide 100% thermal comfort in the room under all control conditions).

Electricity demand for supplementary artificial lighting was also calculated based on the integrated daylight-based control in TRNSYS considering the amount of available daylight on workplaces. This controller (Type4) has a continuous dimming function and on/off with the 1st illuminance setpoint: 500 [lx] and 2nd illuminance setpoint: 300 [lx].

Since the use of heat-pump based systems in buildings is growing significantly, to convert energy demand into site energy (end-use energy) a heat-pump and a chiller system were assumed for heating and cooling in this study. Therefore, the annual average of seasonal performance factor (SPF) was considered 4.2 for heating and 4 for cooling. In order to convert site-energy to source-energy (primary) constant primary energy factor (f_p) equal to 3.31 was assumed for electricity (EN 15603).

Finally, the total annual carbon dioxide emission was estimated in this study by considering the specific CO₂ emission factor equal to 0.469 [KgCO₂e/kWh] for electricity production mix factor in Germany (carbonfootprint.com).

Figure 5 (also see Table A-3 and B-3 in Appendix) shows the annual energy impact as a double color-coded bar for each case of control condition. The left bar shows the annual end-energy [kWh/m².a] (blue: cooling, red: heating, and yellow: electricity) and the right bar indicates the annual carbon footprint [KgCO₂e/kWh] (gray).

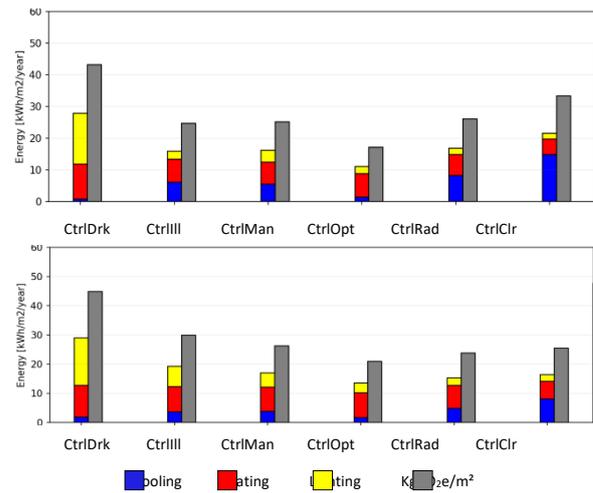


Figure 5: The annual energy consumption and CO₂ emission for each shading system, top: blinds, bottom: EC (set-point temp. 20-27°C)

Shading usage: The total percentage of each shading state occurrence during the occupied hours can indicate how the users' visual connection to the outside is impacted by the use of shading.

It is assumed that the clear state (light cyan color, S0: pulled up for blinds and clear (bleached) for EC glazing) can deliver sufficient view to outdoors and should be provided to users whenever it is not causing discomfort glare or overheating.

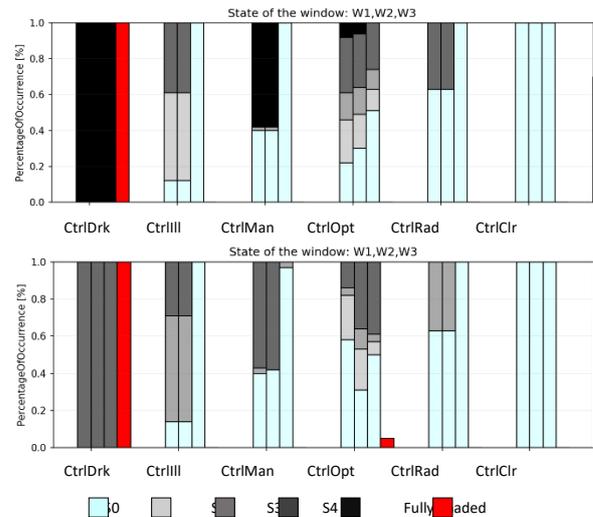


Figure 6: The total percentage of each state occurrence in different window zones, top: blinds, bottom: EC

Figure 6 (also see Table A-4 and B-4 in Appendix) shows the total percentage of occurrence as a triple color-coded bar for each window zone (top, middle, and bottom: from left to right).

Besides, the final red bar indicates the percentage of occurrence when all three window zones were completely shaded at the same time (pulled down and 80° tilted: S4 for blinds and fully tinted: S3 for EC glazing). This incident has been reported annoying by the users and should be avoided as

much as possible. Avoiding this incident ensures the acceptable quality of light in the room with an electrochromic window since the color rendering index (CRI) stays above 80 as long as the three zones are not fully tinted at the same time.

All the results shown in this section (as Figures 2 to 6) can be also found in appendix for both venetian blinds (Tables A-1 to A-4) and electrochromic glazing (Tables B-1 to B-4).

DISCUSSION

The overall performance of a shading system can be assessed by comparing the annual simulated results for each performance indicator (e.g. glare, daylight, thermal comfort, and energy) and predefined acceptance criteria.

In this section, firstly, the overall potential of applying two different types of automated dynamic shading (blinds versus EC) was thoroughly compared by considering a conventional double glazing window without any sun protection as a base-case (see table 1, SHGC=0.61, and $T_{sol}=0.42$).

Secondly, the impact of using a control strategy is investigated by showing the improvement percentages considering the reference control strategies in three steps:

- The clear window with no shade (CtrlClr) is used as a reference. Comparing other strategies to this reference case shows us clearly the impact of using shading for an office with a south-facing window.
- The manual operation (CtrlMan) is used as a reference to show the importance of using an automatic controller for dynamic shading systems.
- The radiation-based control (CtrlRad) is considered as a reference to explore the full potential of optimal automatic control (CtrlOpt) which may be achieved by applying a well-engineered heuristic or predictive model.

Glare protection: By comparing the performance of two shading systems, (EC vs. blinds), one can see that EC glazing with the clear state (bleached) has lower visible transmissivity (T_{vis}) which leads to better glare protection.

Both manual operation and rule-based controls avoided discomfort glare quite similarly.

The optimal control (CtrlOpt) was successful to keep annual DGPe below 4% with EC glazing and below 1% with venetian blinds system (see Figure 2). This can be explained by the possibility of blocking direct sun exposure to the eye when blinds are pulled down and closed (80° tilted), while even in the fully tinted state, EC glazing cannot completely block glare and direct sunlight (Clear, R. et al. 2006).

Table 6 shows the improvement in avoiding discomfort glare (when the DGP value is exceeded from the threshold) as a positive percentage relative to the reference control strategies.

For EC glazing, the optimal control (CtrlOpt) improved the glare protection condition by 88%, 33%, and 73% relative to no shade, manual control, and radiation-based control respectively. This shows that a manual control for EC may be adequate in terms of glare protection and daylight improvement, and optimal automatic control can only improve it by 33%.

Applying optimal control for external blinds, discomfort glare condition is also improved by 99%, 91%, and 97% relative to no shade, manual control, and radiation-based control respectively.

Table 6: Visual comfort improvements by applying a shading system with different control strategies

	relative to CtrlClr		relative to CtrlMan		relative to CtrlRad	
	Glare	Day-light	Glare	Day-light	Glare	Day-light
EC						
CtrlMan	82%	47%	-	-	59%	-26%
CtrlOpt	88%	64%	33%	31%	73%	13%
CtrlRad	56%	58%	-145%	21%	-	-
CtrlClr	-	-	-457%	-89%	-128%	-139%
Blinds						
CtrlMan	85%	58%	-	-	63%	9%
CtrlOpt	99%	78%	91%	48%	97%	53%
CtrlRad	59%	54%	-171%	-10%	-	-
CtrlClr	-	-	-560%	-140%	-144%	-118%

Available daylight: Similar to glare protection, EC glazing with the clear state (bleached) may avoid too-bright conditions; but it makes space darker compared to blinds (shades all up), due to lower visible transmissivity (T_{vis}).

Both manual and rule-based controls improved the useful daylight availability for workplaces close (G1) and farther away from the window (G2); however external venetian blinds performed more effectively by redirecting the daylight deeper into space for users G2 (see Figure 3).

Considering the impact of automatic controls, table 6 also shows the improvement in providing useful daylight relative to the references.

For EC glazing, the optimal control (CtrlOpt) improved the daylighting by 64%, 31%, and only 13% relative to no shade, manual control, and radiation-based control respectively. This means that the improvement by using optimal control for switchable windows is very minor (only 13%), while the potential of applying an optimal automatic controller for blinds is more significant (53%).

In general, improving the control algorithm from simple radiation-based to optimal control is more promising in providing visual comfort for venetian blinds than EC glazing.

Thermal comfort: The EC glazing system prevented more dissatisfying warm conditions due to lower solar transmittance (T_{sol}) and solar heat gain coefficient (SHGC) for a clear window with no shade (CtrlClr) in comparison to the clear window when venetian blinds are completely pulled up (see Table 1).

One can see that manual operation for both EC and blinds works more effectively to reduce thermal discomfort in comparison to radiation-based control (see Figure 4).

By applying optimal automated external venetian blinds, avoiding more dissatisfying warm conditions is possible. This can be explained by the lower SHGC of the pulled down blinds in comparison to the fully tinted state of EC glazing (see Table 1).

It is also clear that by using an optimal control (CtrlOpt) providing thermal comfort is achievable only to some extent (up to 80% for EC and 84% for blinds) when the dead-band temperature for heating and cooling is 20°C and 27°C respectively (see Figure 4).

By considering the not-controlled cases (no-shade and always shaded), it can be pointed out that part of this cold discomfort can not be avoided even by opening the shadings (6% for blinds and 7.5% for EC). Similarly, part of warm discomfort can not be diminished even by completely closing the shadings (3% for blinds and 10% for EC).

Of course by using active heating and cooling systems more often thermal comfort can be provided for all occupied hours, but this comes at the cost of higher energy consumption.

Table 7 shows the improvement in avoiding thermal discomfort by applying various types of controls (set-point range: 20–27°C).

While manual shading was very successful for avoiding glare, providing thermal comfort is not achieved significantly; and the improvement due to the use of manual shading is only 26% for EC and 33% for blinds relative to no shade (CtrlClr).

For the EC glazing system, compared to radiation base control the optimal control (CtrlOpt) worsened the thermal comfort condition slightly (6%). This incident happened because the optimal control tries to improve all aspects of energy along with visual and thermal comfort. So, by sacrificing a little in thermal comfort, the optimal control may save a larger amount of energy.

Table 7: Thermal Comfort improvements by applying a shading system with different control strategies

	relative to CtrlClr	relative to CtrlMan	relative to CtrlRad
EC			
CtrlMan	26%	-	-106%
CtrlOpt	50%	33%	-6%
CtrlRad	15%	-15%	-
CtrlClr	-	-35%	-18%
Blinds			
CtrlMan	33%	-	18%
CtrlOpt	69%	53%	62%
CtrlRad	18%	-22%	-
CtrlClr	-	-49%	-23%

Energy consumption: The results of simulations clearly show the impact of dynamic shading systems on the reduction of overall end-use energy, particularly by using optimal automatic control. Considering a conventional double glazing window without any sun protection (see table 1 base-case, SHGC=0.61, and $T_{sol}=0.42$), applying an EC glazing saves 38-39%, while an external shading saves 49-48% of total annual end-use energy (respectively set-points 20-27°C and 21-25°C). The same reduction ratio can be expected in terms of total primary energy and CO₂ emission which shows significant potential in reducing global warming issues.

Comparing blinds to EC, one can also see that the automated blinds system was able to reduce cooling energy by 26%, heating energy by 13%, and electricity for lighting by 52% regarding automated EC glazing system (see Figure 5).

Table 8: Total end-use energy savings potentials by applying a shading system with different strategies

	relative to CtrlClr	relative to CtrlMan	relative to CtrlRad
Set-points	20° - 27°C		
EC			
CtrlMan	-3%	-	-10%
CtrlOpt	18%	21%	12%
CtrlRad	6%	9%	-
CtrlClr	-	3%	-7%
Blinds			
CtrlMan	25%	-	4%
CtrlOpt	49%	32%	35%
CtrlRad	22%	-4%	-
CtrlClr	-	-33%	-28%

Table 8 shows the impact of automatic controls on saving total end-use energy. By improving the control strategy from no shade to optimal control, 18% and 49% of total end-use energy can be reduced by EC glazing and blinds system respectively. Besides, from radiation-based to optimal control the total end-use energy can be reduced by 12% for EC, but 35% for blinds.

In terms of hourly electricity demand, automated shading systems can avoid critical peak demands for electricity. The results show that the optimal automatic control can reduce peak demand for cooling by 47% for EC and by 63% for blinds relative to the no-shade case; while the heating demands are increased slightly (about 13%).

Furthermore, using the optimal control, peak demand for cooling can be reduced by 26% for EC and by 33% for blinds relative to the manual controller case. In relation to radiation-based control, the reduction reaches 29% for EC and 40% for blinds.

CONCLUSION

This paper proposes a simulation-based framework to evaluate the performance of shading systems and the impact of different control strategies on energy, visual comfort (glare, daylight availability, and view), and thermal comfort.

Integrated daylight and thermal simulations by using state of the art methods of modeling complex fenestration systems make predicting the behavior of shading systems more dependable.

This study shows that, despite the complexity of dynamic shading behavior concerning the energy and comfort requirements, a well-engineered control strategy can successfully regard all aspects of visual and thermal comfort as well as saving energy. The results clearly show that firstly, applying a rule-based controller can reduce cooling demand and critical peaks. Secondly, developing more advanced strategies, such as predictive control, has a significant impact on not only energy savings and reduction of environmental impacts, but also on visual and thermal comfort provided in office spaces.

During the very early stage of design, information about the full potential of shading systems may help climate consultancies/designers to convince clients for this profitable investment in applying shading systems and developing an automatic control strategy.

The results showed that: (a) in comparison to the base-case window, use of an automated dynamic shading can reduce the total annual end-use energy by about 38% for EC glazing and by nearly 49% for external shading; (b) similarly in regard to primary energy and CO₂ emission, an automatic shading is able to reduce a significant amount of the environmental impacts, (b) the differences between two types of shading systems in regard to providing visual and thermal comfort are not noticeable when an optimal control strategy is applied, however, an external venetian blind may perform more effectively than electrochromic glazing in avoiding discomfort glare, (c) the differences between manual operation and simple rule-based algorithms regarding energy and thermal comfort are noticeable, (d) the control algorithms have a strong influence on users connectivity to outside (view/privacy) and lighting quality (e.g. color rendering) which should not be overlooked during the development of control algorithms.

Despite all the studies that have been done for making the anticipated benefits of a dynamic façade true, the application of these methods in a real building is still limited to affordable sensor-based solutions. Due to the high level of complexity in integrated daylight and thermal model, the level of uncertainty in weather forecasting, rapid changes in sky condition, user behavior, and individual preference; methods of developing new control algorithms need to be further investigated.

ACKNOWLEDGMENT

This research was part of the LiSA project (Licht- und Solarmanagement mit aktiven und modellprädiktiv geregelten Komponenten; grant agreement number: 03ET1416A) at the Technical University of Kaiserslautern in Germany. The project was funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy.

REFERENCES

- ASHRAE (Ed.) (2013): ANSI/ASHRAE Standard 55-2013. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ASHRAE
- Bakker, L. G., Hoes-van Oeffelen, E. C. M., Loonen, R. C. G. M., & Hensen, J. L. M. (2014). User satisfaction and interaction with automated dynamic façades: A pilot study. *Building and Environment*, 78, 44-52.
- Bordass, B., Cohen, R., Standeven, M., & Leaman, A. (2001). Assessing building performance in use 2: technical performance of the Probe buildings. *Building Research & Information*, 29(2), 103-113.
- Bueno, B., Wienold, J., Katsifaraki, A., & Kuhn, T. E. (2015). Fener: A Radiance-based modeling approach to assess the thermal and daylighting performance of complex fenestration systems in office spaces. *Energy and Buildings*, 94, 10-20.
- Clear, R. D., Inkarojrit, V., & Lee, E. S. (2006). Subject responses to electrochromic windows. *Energy and Buildings*, 38(7), 758-779.
- DIN 4108-2 (2013) Thermal protection and energy economy in buildings - Part 2: Minimum requirements to thermal insulation. "Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz, Februar 2013"
- DIN EN 15603 (2008): Energy performance of buildings – Overall energy use and definition of energy ratings
- Dussault, J. M., Sourbron, M., & Gosselin, L. (2016). Reduced energy consumption and enhanced comfort with smart windows: Comparison between quasi-optimal, predictive and rule-based control strategies. *Energy and Buildings*, 127, 680-691.
- Dutta, R. (2018, September). Modeling an electrochromic window using a multi-criteria control strategy. In *Building Performance Analysis Conference and Simbuild co-organized by ASHRAE and IBPSA-USA, Chicago, IL*.
- Firląg, S., Yazdanian, M., Curcija, C., Kohler, C., Vidanovic, S., Hart, R., & Czarnecki, S. (2015). Control algorithms for dynamic windows for residential buildings. *Energy and Buildings*, 109, 157-173.

- Ganji Kheybari A., Hoffmann S. (2018). Exploring the potential of the dynamic facade: Simulating daylight and energy performance of complex fenestration systems, In *Proceedings of BauSIM 2018*, KIT, (pp. 286-294).
- Ganji Kheybari A., Hoffmann S. (2019). A simulation-based framework exploring the controls for a dynamic facade with electrochromic glazing. In *PowerSkin 2019 Conference-Proceedings*, (pp. 263-274).
- Gehbauer, C., Blum, D. H., Wang, T., & Lee, E. S. (2020). An assessment of the load modifying potential of model predictive controlled dynamic facades within the California context. *Energy and Buildings*, 109762.
- Hiller, M., & Schöttl, P. (2014). Modellierung komplexer Verglasungssysteme in TRNSYS. In *Proceedings of BauSIM2014, the Fifth German-Austrian IBPSA conference*(pp. 387-394).
- Inkarojrit, V. (2005). Balancing comfort: occupants' control of window blinds in private offices.
- Larson, G. W., & Shakespeare, R. (2004). *Rendering with Radiance: the art and science of lighting visualization*. Booksurge Llc.
- Lee, E. S., DiBartolomeo, D. L., & Selkowitz, S. E. (1998). Thermal and daylighting performance of an automated venetian blind and lighting system in a full-scale private office. *Energy and buildings*, 29(1), 47-63.
- Lee, E.S., Zhou, L., Yazdani, M., Inkarojrit, V., Slack, J., Rubin, M., & Selkowitz, S.E. (2002). Energy performance analysis of electrochromic windows in New York commercial office buildings. (LBNL-50096). Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- McDowell, T. P., Bradley, D. E., Hiller, M., Lam, J., Merk, J., & Keilholz, W. *TRNSYS 18: The Continued Evolution of the Software*.
- McNeil, Andrew, and E. S. Lee. "A validation of the Radiance three-phase simulation method for modeling annual daylight performance of optically complex fenestration systems." *Journal of Building Performance Simulation* 6.1 (2013): 24-37.
- Motamed, A., Bueno, B., Deschamps, L., Kuhn, T. E., & Scartezzini, J. L. (2020). Self-commissioning Glare-based Control System for Integrated Venetian Blind and Electric Lighting. *Building and Environment*, 106642.
- Nabil, A., & Mardaljevic, J. (2005). Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings. *Lighting Research & Technology*, 37(1), 41-57.
- Piccolo, A., & Simone, F. (2015). Performance requirements for electrochromic smart window. *Journal of Building Engineering*, 3, 94-103.
- Reinhart, C. F. (2004). Lightswitch-2002: a model for manual and automated control of electric lighting and blinds. *Solar energy*, 77(1), 15-28.
- Roche, L. (2002). Summertime performance of an automated lighting and blinds control system. *Lighting Research and Technology*, 34(1), 11-27.
- S. Nikoofard, V.I. Ugursal, I. Beausoleil-Morrison, Technoeconomic assessment of the impact of window shading retrofits on the heating and cooling energy consumption and GHG emissions of the Canadian housing stock, *Energy Build.* 69 (February) (2014) 354–366.
- T. Inoue, Y. Matsuo, T. Ibamoto, Study on the thermal performance of ventilation window, in: *Proceedings of International Symposium on Thermal Application of Solar Energy*, 1985, pp. 221–226.
- Wienold, J. (2004). Evalglare—A new RADIANCE-based tool to evaluate daylight glare in office spaces. In *3rd International RADIANCE workshop 2004*.

APPENDIX

Overall performance of an open office south-facing window with venetian blinds

Table A-1: Percentage of occupied hours with visual discomfort, including discomfort glare and not useful daylight

CtrlsName	DGPe[%] ≥ 0.4	DGP [%]								UDI[%]						
		Acceptable		Perceptible		Disturbing		Intolerable		Useful		Bright		Dark		
	DGP max	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G1	G2	
CtrlDrk	0%	100%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
CtrlIll	6%	95%	100%	3%	0%	1%	0%	2%	0%	82%	76%	2%	0%	15%	24%	
CtrlMan	7%	94%	98%	2%	1%	2%	0%	2%	1%	75%	59%	8%	1%	17%	40%	
CtrlOpt	1%	98%	100%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	87%	80%	1%	0%	12%	20%	
CtrlRad	19%	84%	97%	6%	2%	5%	0%	5%	1%	73%	82%	16%	2%	11%	16%	
CtrlClr	46%	56%	81%	10%	9%	11%	3%	24%	6%	40%	66%	49%	18%	11%	15%	

Table A-2: Percentage of occupied hours with thermal discomfort, including cold (PMV<-1) or warm (PMV>+1)

CtrlsName	ThermalComfort[%]					
	Neutral		Warm		Cold	
	G1	G2	G1	G2	G1	G2
CtrlDrk	84%	88%	3%	3%	13%	9%
CtrlIll	65%	69%	27%	26%	8%	5%
CtrlMan	66%	71%	26%	24%	8%	5%
CtrlOpt	84%	88%	8%	8%	8%	5%
CtrlRad	59%	63%	34%	32%	8%	5%
CtrlClr	49%	54%	45%	44%	6%	3%

Table A-3: Total annual energy consumption (site and source energy) and annual carbon emission

Set-point	PrimaryEnergy		CarbonEmission		EndUseEnergy[kWh/m2/a]						PeakDemand[Wh/m2]			
	20-27	21-25	20-27	21-25	20-27			21-25			20-27		21-25	
	[kWh/m2/a]		[KgCO2e/m2]		Cooling	Heating	Lighting	Cooling	Heating	Lighting	Cooling	Heating	Cooling	Heating
CtrlDrk	92.2	102.7	43.2	48.2	0.8	11.0	16.1	2.0	12.9	16.1	8.0	10.6	9.8	11.2
CtrlIll	52.7	67.1	24.7	31.5	6.1	7.2	2.6	8.8	8.8	2.6	16.2	10.8	17.6	11.5
CtrlMan	53.5	67.9	25.1	31.8	5.4	7.0	3.8	8.2	8.5	3.8	14.7	10.9	16.2	11.6
CtrlOpt	36.4	47.2	17.1	22.2	1.3	7.5	2.2	2.8	9.3	2.2	9.8	10.4	12.4	11.1
CtrlRad	55.7	70.6	26.1	33.1	8.1	6.8	1.9	11.2	8.2	1.9	16.3	10.8	17.7	11.5
CtrlClr (Base-case)	71.2	90.5	33.4	42.5	14.9	4.7	1.9	19.1	6.3	1.9	26.2	9.1	27.8	10.3

Table A-4: Percentage of occupied hours with retracted shades or tinted glazing on each window zone

CtrlsName	Occurrence in W1 [%]					Occurrence in W2 [%]					Occurrence in W3 [%]					All
	S0	S1	S2	S3	S4	S0	S1	S2	S3	S4	S0	S1	S2	S3	S4	Fully Shaded
CtrlDrk	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
CtrlIll	12%	49%	0%	39%	0%	12%	49%	0%	39%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%
CtrlMan	40%	0%	3%	-1%	58%	40%	0%	3%	-1%	58%	100%	0%	0%	0%	0%	0%
CtrlOpt	22%	24%	15%	31%	8%	30%	19%	15%	30%	6%	51%	12%	11%	26%	0%	0%
CtrlRad	63%	0%	0%	37%	0%	63%	0%	0%	37%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%
CtrlClr	100%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%

Overall performance of an open office south-facing window with electrochromic glazing (EC)

Table B-1: Percentage of occupied hours with visual discomfort, including discomfort glare and not useful daylight

CtrlsName	DGPe[%] ≥ 0.4	DGP [%]								UDI[%]						
		Acceptable		Perceptible		Disturbing		Intolerable		Useful		Bright		Dark		
	DGP max	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G1	G2	
CtrlDrk	3%	98%	100%	1%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
CtrlIll	5%	96%	98%	2%	1%	1%	0%	1%	0%	66%	29%	0%	0%	33%	71%	
CtrlMan	7%	94%	98%	3%	1%	1%	0%	2%	1%	73%	49%	5%	0%	22%	51%	
CtrlOpt	4%	96%	98%	2%	1%	1%	0%	1%	1%	81%	74%	0%	0%	18%	26%	
CtrlRad	16%	89%	96%	4%	1%	2%	1%	5%	2%	78%	75%	9%	0%	13%	25%	
CtrlClr	37%	64%	89%	13%	4%	7%	2%	15%	5%	48%	71%	39%	11%	13%	18%	

Table B-2: Percentage of occupied hours with thermal discomfort, including cold (PMV<-1) or warm (PMV>+1)

CtrlsName	ThermalComfort[%]					
	Neutral		Warm		Cold	
	G1	G2	G1	G2	G1	G2
CtrlDrk	76%	81%	10%	9%	14%	9%
CtrlIll	72%	76%	18%	17%	10%	7%
CtrlMan	71%	76%	20%	18%	9%	6%
CtrlOpt	80%	85%	10%	9%	9%	6%
CtrlRad	67%	71%	24%	23%	9%	6%
CtrlClr	61%	65%	32%	31%	7%	4%

Table B-3: Total annual energy consumption (site and source energy) and annual carbon emission

Set-point	PrimaryEnergy		CarbonEmission		EndUseEnergy[kWh/m2/a]						PeakDemand[Wh/m2]			
	20-27	21-25	20-27	21-25	20-27			21-25			20-27		21-25	
	[kWh/m2/a]		[KgCO2e/m2]		Cooling	Heating	Lighting	Cooling	Heating	Lighting	Cooling	Heating	Cooling	Heating
CtrlDrk	95.7	107.1	44.9	50.2	1.8	10.9	16.2	3.4	12.8	16.2	10.3	11.7	12.1	12.4
CtrlIll	63.6	76.5	29.8	35.9	3.7	8.6	6.9	5.9	10.3	6.9	13.2	11.3	14.8	12.0
CtrlMan	56.0	69.3	26.3	32.5	3.8	8.2	4.9	6.2	9.9	4.9	13.2	11.3	14.8	12.0
CtrlOpt	44.5	55.4	20.9	26.0	1.6	8.5	3.3	3.1	10.3	3.3	9.8	11.1	11.6	11.7
CtrlRad	50.8	64.4	23.8	30.2	4.8	7.9	2.6	7.4	9.5	2.6	13.8	11.1	15.3	11.8
CtrlClr	54.1	70.3	25.4	32.9	8.0	6.1	2.3	11.3	7.6	2.3	18.4	9.8	20.2	10.8

Table B-4: Percentage of occupied hours with retracted shades or tinted glazing on each window zone

CtrlsName	Occurrence in W1 [%]					Occurrence in W2 [%]					Occurrence in W3 [%]					All
	S0	S1	S2	S3	S4	S0	S1	S2	S3	S4	S0	S1	S2	S3	S4	Fully Tinted
CtrlDrk	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	100%
CtrlIll	14%	0%	57%	29%	0%	14%	0%	57%	29%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%
CtrlMan	40%	0%	3%	57%	0%	42%	0%	0%	58%	0%	97%	0%	3%	0%	0%	0%
CtrlOpt	58%	24%	4%	14%	0%	31%	22%	11%	36%	0%	50%	7%	4%	39%	0%	5%
CtrlRad	63%	0%	37%	0%	0%	63%	0%	37%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%
CtrlClr	100%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%

ENERGY DEMAND REDUCTION DUE TO AN INTELLIGENT SHADING CONTROL STRATEGY

P. Klanatsky¹, H. Plank¹ and C. Heschl^{1,2}

¹Fachhochschule Burgenland GmbH, University of Applied Sciences, Department Energy and Environmental Management, Pinkafeld, Austria

²Forschung Burgenland GmbH, Center for Building Technology, Pinkafeld, Austria

ABSTRACT

The energy efficiency of buildings with large glass façades depends strongly on their shading design. Particularly the applied shading control strategy plays an decisive role if surface heating and cooling systems with a large thermal inertia are used for demand side management objectives. Hence, a comprehensive, intelligent control strategy which considers all relevant HVAC subsystems is needed to facilitate the decarbonisation of the European power supply. Such an intelligent control strategy was developed for thermally activated building systems and external shading devices. It was validated for a “living laboratory” building under real operating conditions over two years. Results show that a significant reduction of the energy demand for the static cooling surfaces of about 70% was achieved with a simultaneous reduction of the complaints about high room air temperatures.

Keywords: shading device, blinds, control strategy

INTRODUCTION

For office buildings with large glass façades, the cooling demand depends strongly on the incident solar radiation (Planas et al., 2018). Furthermore, parameters such as type of glass (insulated glass units, selective glazing systems, etc.) and the external shading technology that is in place are key drivers of cooling demand (Westphal and Andreis, 2016). The operation of the shading devices to reduce the incident solar radiation through a glass façade can also take into account the balance between daylighting and energy consumption (Tzempelikos and Shen, 2011; Sagerschnig et al., 2010).

In the European Union, the gross energy consumption required for heating and cooling stands at a staggering 50% of total energy needs with 80% of this portion consumed by buildings alone. It is therefore crucial to accelerate the efforts laid out in the EUs Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) to achieve the EU Commission’s Energy 2030 targets (European Commission, 2018).

In order to study the energy savings potential of an office building with glass façades and with static heating and cooling surfaces, an investigation was

carried out using a “living laboratory” (office building operating under real user conditions). Preliminary findings indicated that the heating and cooling strategy for the buildings surfaces was not ideal and incoherent with the other installed systems within the building such as the shading system/shading blinds on the outside of the glass façades. Moreover, the building occupants complained of abnormally high room air temperatures (primarily in rooms located in the South and West of the building) and about the permanent disruption brought about by the changing of the position of the external shading devices (noise pollution by the servomotors). A survey conducted by Fuetterer et al. (2017) confirmed the findings of Waide (2013) that a high fraction of building automation systems have faults/defects or errors, caused by poor design of the systems during the planning stage, rushed installation procedures leading to incorrect installation and commissioning, inadequate inspection and review and also handling errors after post-commissioning.

METHODOLOGY

Analyzed Object

For these investigations, the office building of the Forschung Burgenland GmbH in Pinkafeld, the ENERGETIKUM (Figure 1) was used.



Figure 1: ENERGETIKUM from the point of view of South-West

The ENERGETIKUM is two-story building (with 601.2 m² main usable area) that also serves as a living laboratory, which means that research is done while the building is concurrently used on an everyday basis as office space. The office complex was built in the

year 2014 and attained full occupancy in 2015. The energy performance indicators of the office complex for heating and cooling (energy performance certificate - asset rating) are listed in table 1.

Table 1:
Energy performance indicators of the energy demand for space heating and cooling

Space heating	Space cooling
46.75 kWh/(m ² a)	26.43 kWh/(m ² a)

Building Envelope and Glazing / Shading

While the east and the north side of the office building consist of insulated reinforced concrete, the building envelope on the south and the west side consist of a triple glazing façade. The ground floor façade has external shading devices (blinds), which are integrated in the building automation control system and also internal manually operated shading devices (vertical blinds). The upper floor has external shading devices (blinds) and also internal shading devices (roller blinds). Both are integrated in the building automation control system.

Technical building equipment

Only the most important technical building equipments which pertain directly to this study are described here. For space heating and cooling with a reversible heat pump three different static heating/cooling surfaces can be activated: the floor; a near surface heating/cooling system in the ceiling and also a concrete core activation of the ceiling. An air conditioning system is used to ensure hygienic air exchange rates.

Systematic approach

The starting point of this work was an analysis of the operation mode and also of the set values of the supply temperatures of the static heating and cooling surfaces. Also the room air temperatures in the thermal zones and the air conditioning system were analysed. It could be determined that in the winter months the air temperature in some office rooms reached more than 26°C. Consequently the near surface cooling system in the ceiling and the thermal activation of the building structure were active throughout the day. The analysis also demonstrated that for both systems in the ceiling, different set values of the inlet temperatures of the fluid were considered. In the night that followed, the floor heating system was activated because of the room cooling down due to the low outside air temperature. Also the building occupants were dissatisfied with the control strategies of the other systems (like external shading devices and the volume flow rates of the supply air in the thermal zone). Because the air conditioning system operated most of the time at partial load (24/7), the control behaviour of the preheater, the cooling register and also of the reheater was not ideal. On the basis of these

preliminary results, the following measures were taken:

- Installation of a weather station on the building's flat roof surface to measure the prevailing climatic conditions (Plank et al., 2019).
- Implementation of a cloud-based measurement data acquisition system to collect all operating data of the building automation system.
- Full integration of the external and internal shading devices in the building automation and control system.
- Development of a BACnet-Open Platform Communication (OPC)-Matlab user interface to read and write data from or to devices of the building control system (see Figure 2). The BACnet-OPC-Matlab user interface also includes the control strategies for the heating and cooling surfaces, for the external shading devices and for the hygienic air change for all thermal zones.
- Manual optimization of the control parameters for the preheater, the cooling register and the reheater of the air conditioning system and the defining of a time schedule for the operating hours.
- Evaluation of the energy demand by using the developed BACnet-OPC-Matlab user interfaces and control strategies.



Figure 2: Extension of the BACnet and integration of the BACnet-OPC-Matlab user interface

The following sections describe the activities undertaken in detail and the impact of these measures.

MATLAB USER-INTERFACE

Communication between the BACnet and Matlab can be maintained by using an BACnet OPC Server and the OPC toolbox in Matlab. In the next subsections the Matlab user interface with graphical user interfaces for space heating and cooling, hygienic air change and external shading devices will be explained.

Space heating and cooling

For space heating and cooling, the following thermally activated building systems can be used:

- Floor heating/cooling system (short name: FBH).
- Near surface heating/cooling system in the ceiling (short name: BKAON).
- Heating/cooling system in the concrete core in the ceiling (short name: BKA).

Depending on the operating mode of the distributor (warm/cold), the system for space heating (red: FBH) and also for space cooling (blue: BKAON) can be chosen in the graphical user interface (see Figure 3).

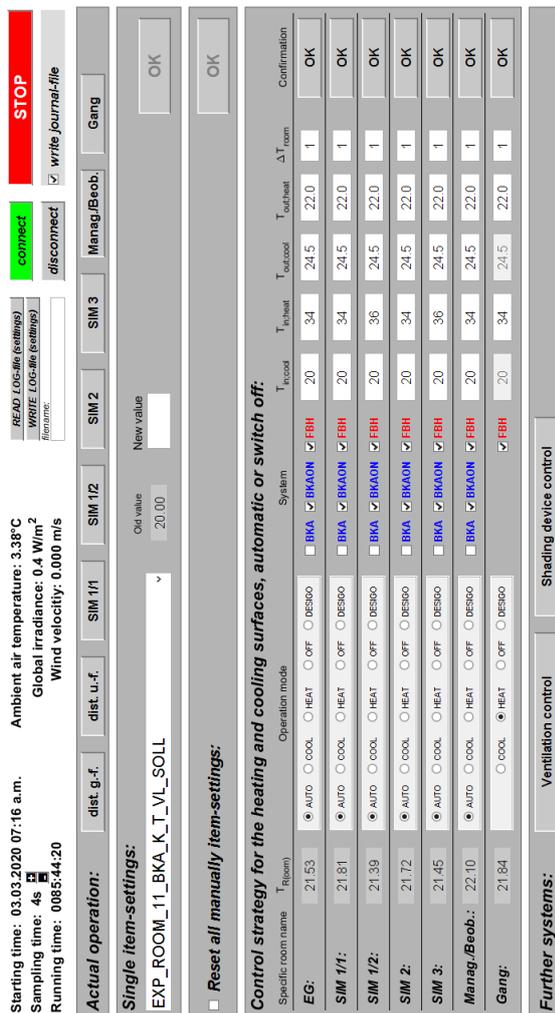


Figure 3: GUI of the developed BACnet-OPC-Matlab user interface for controlling the heating and cooling surfaces

Figure 4 shows the implemented control strategy (two-point controllers) of these systems for heating and cooling (and also for automatically operation between heating and cooling).

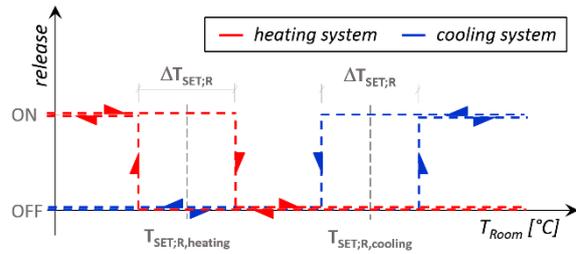


Figure 4: Control strategy of the surface heating and cooling surfaces

Hygienic air change

The operation mode of the air conditioning system is set to guarantee a hygienic air exchange rate in the thermal zones. To control the volume flowrate of the supply air in each thermal zone, a two-point controller was considered for each volumetric flow controller (see Figure 5). In an additional graphical user interface for ventilation (similar to that in Figure 3) the necessary parameters are defined as user inputs for each thermal zone.

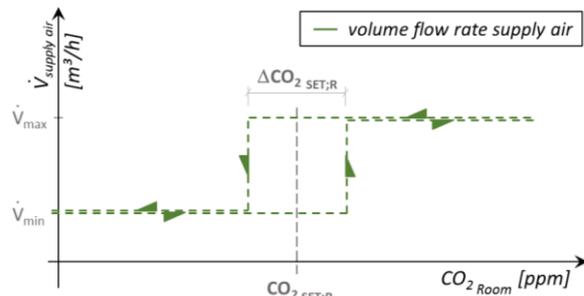


Figure 5: Control strategy of the volume flow rate of the supply air

Furthermore, the control parameters for the water/air heat exchangers and the set value for dehumidification (cooling register) of the air conditioning system were adapted and a schedule for the operating hours was implemented. Also, the control variable of the humidity of the exhaust air was changed from relative humidity to absolute humidity.

External shading devices (blinds)

To control the incident solar radiation, the external shading devices can be used. In each thermal zone the different oriented devices can be adjusted using two parameters. The first parameter to adjust the external shading device is the height of shading and the second is the slat angle of the blinds (see Figure 6).

In Figure 7, the flow chart of the intelligent control strategy is displayed. As the flow chart shows, the control strategy of the external shading devices is changing with the operational mode of the space heating and cooling systems (see also Klanatsky et al. (2019a) and Klanatsky et al. (2019b)).

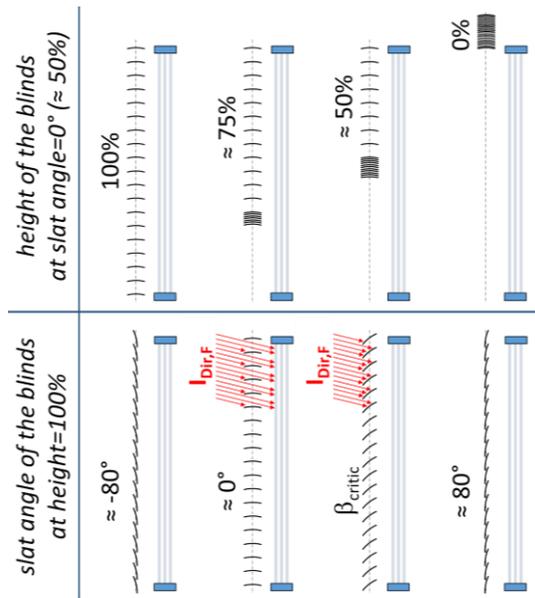


Figure 6: Impact of the parameter “height” and “slat angle” on the position of the blinds

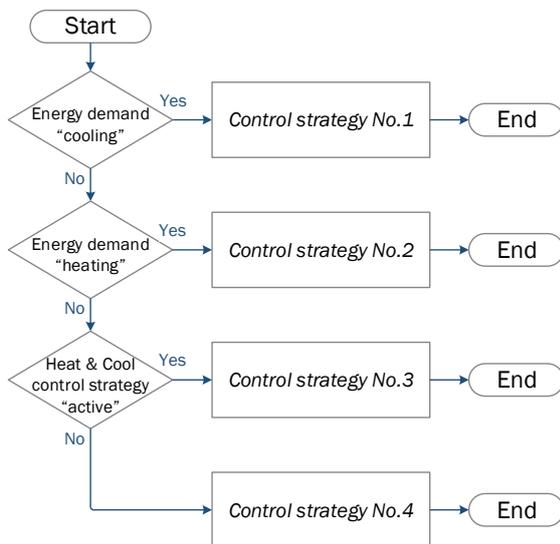


Figure 7: Flow Chart of the considered control strategy of the external shading devices

Each of the four displayed control strategies (No. 1 to No. 4) in Figure 7 have different impacts on the position of the blinds (due to different parameters for the height of shading and the slat angle of the blinds) but all ensure glare protection of the building occupants. Therefore the angle β_{critic} can be calculated with the geometrical information of the blinds, the orientation of the glass façade and the position of the sun (relative azimuth angle of the façade, elevation of the sun, angle of incidence). The following functions will be used for the calculation of the height of the shading and for the slat angle of the blinds:

$$height=f(\gamma_{facade}; \bar{T}_{G,F,90}; \bar{T}_{Room}; \bar{T}_{Ambient}; T_{SET;R,heating}; T_{SET;R,cooling}; \Delta T_{SET;R})$$

$$slat\ angle=f(\gamma_{facade}; \bar{T}_{G,F,90}; \bar{T}_{D,H} / \bar{T}_{G,H}; \bar{T}_{Room}; \bar{T}_{Ambient}; T_{SET;R,heating}; T_{SET;R,cooling}; \Delta T_{SET;R}; \beta_{critic})$$

The calculation interval for the mean values of the temperatures and the solar irradiation is a user input in the graphical user interface for the shading devices. It can also be seen that the set values of the room air temperature for heating ($T_{SET;R,heating}$) or cooling ($T_{SET;R,cooling}$) have an impact on the setting of the blinds. Therefore, the activation of the cooling system takes place when the room air temperature increases despite the maximum height of the shading device with the optimized slat angle (at least equal to β_{critic}).

BOUNDARY CONDITIONS

Weather conditions changed during the investigations or optimization. Therefore the installed weather station and the implemented cloud-based measurement data acquisition system to evaluate the weather conditions was used. In the following Figure 8 the daily average outside ambient temperature and also the global horizontal irradiance is shown. The displayed data gap from May 2018 to the middle of June 2018 was closed with data from the subsequent period, from mid-June 2018 to July 2018. The annual average outside ambient temperature from 03/2018 to 02/2019 is about 11.37°C and from 03/2019 to 02/2020 about 11.27°C. Also the summarized global horizontal irradiance from 2018 to 2019 is about $I_{global;2018}=1,321\text{ kWh/m}^2$ and from 2019 to 2020 about $I_{global;2019}=1,223\text{ kWh/m}^2$.

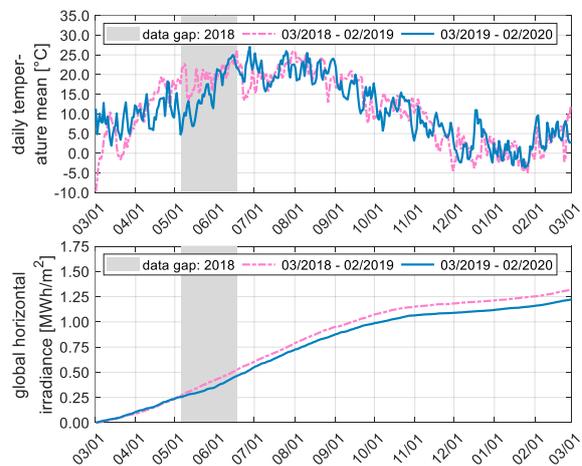


Figure 8: Daily average outside ambient temperature (top) and global horizontal irradiance (bottom) at the study location (Pinkafeld, Austria) from 03/2018 to 02/2020

The calculated heating degree days (HDD) and cooling degree hours (CDH) are listed in Table 2 and Table 3. A comparison of the indicators of the two time periods shows that from 2019 to 2020 the heating degree days are up to 4% higher than the values from

2018 to 2019, depending on the reference temperature. In contrast to this the cooling degree hours from 2019 to 2020 are up to 12% lower than the values from 2018 to 2019.

*Table 2:
Heating degree days (HDD) with two different room air temperatures (subscript)*

	03/2018 – 02/2019	03/2019 – 02/2020
HDD _{20/12}	2,913 K·d	2,965 K·d
HDD _{22/12}	3,268 K·d	3,373 K·d

*Table 3:
Cooling degree hours (CDH) with two different reference temperatures (subscript)*

	03/2018 – 02/2019	03/2019 – 02/2020
CDH _{18.3}	10,105 K·h	8,897 K·h
CDH _{20.0}	6,749 K·h	6,011 K·h

RESULTS

The next subsections present a comparison between the experimental data from 03/2018 to 02/2019 and the experimental data from 03/2019 to 02/2020. Because of the character of the building, implementation of all measures was not complete until July 2019, therefore not all the measures and their impacts took effect in March 2019.

Room air temperature

The control strategies for space heating and cooling and also for the external shading devices influences the distribution of the room air temperature. Figure 9 shows the histogram of the room air temperatures of the ground floor and Figure 10 of the upper floor. In both figures, a bimodal distribution of the room air temperatures become apparent after taken measures.

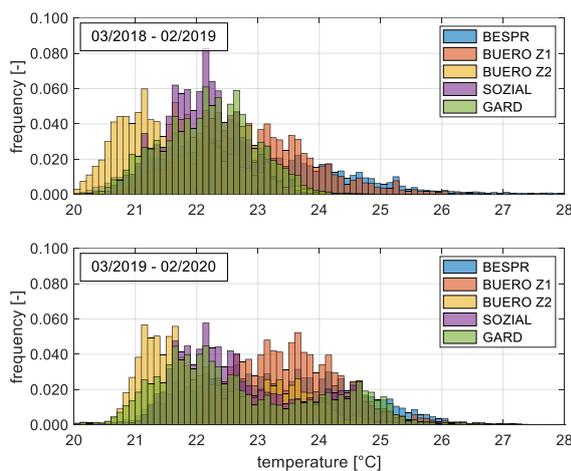


Figure 9: Histogram of room air temperatures (legend: specific room names), ground floor (top: 03/2018-02/2019; bottom: 03/2019-02/2020)

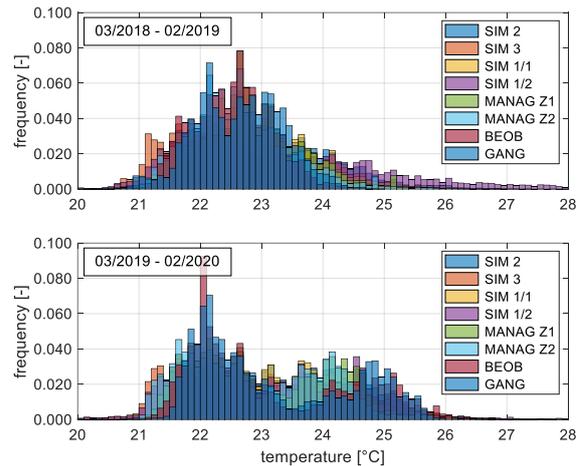


Figure 10: Histogram of room air temperatures (legend: specific room names), upper floor (top: 03/2018-02/2019; bottom: 03/2019-02/2020)

Space Heating

The comparison of the monthly energy demand for space heating with the activated static heating surfaces is shown in Figure 11. The total energy demand for space heating is slightly increased, from 17,463 kWh/a to 18,726 kWh/a. One reason of this is the increased number of heating degrees days (cf. Table 2).

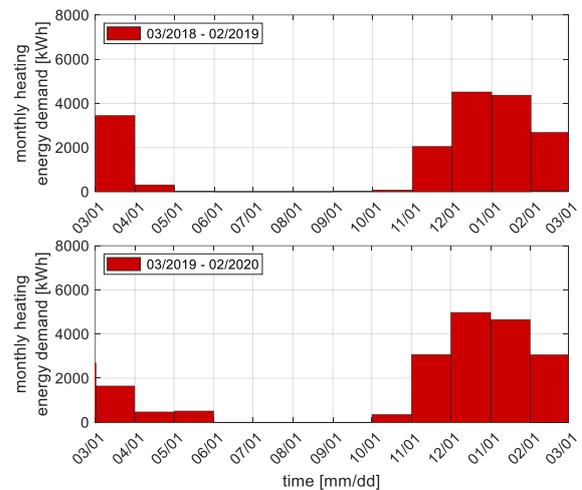


Figure 11: Monthly energy demand for space heating (with static heating surfaces) (top: 03/2018-02/2019; bottom: 03/2019-02/2020)

Space Cooling

Figure 12 shows the comparison of the monthly energy demand for space cooling with the activated static cooling surfaces. The actions taken caused a dramatic decrease in the energy demand for space cooling, from a total of 18,282 kWh/a to 5,461 kWh/a. Despite the reduction of the cooling degree hours, (cf. Table 3) the main part of the reduction can be attributed to the strictly implemented control strategy for the external shading devices.

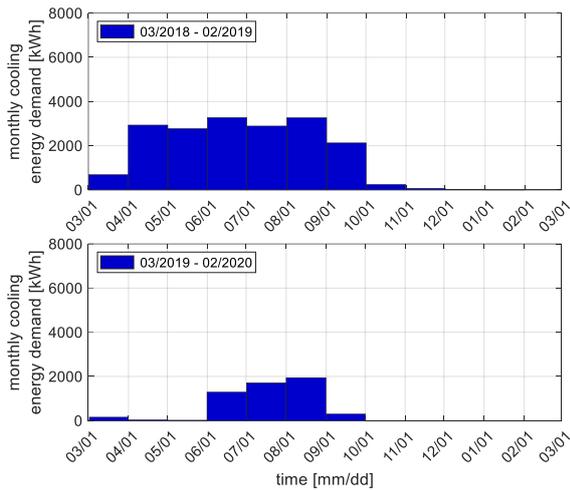


Figure 12: Monthly energy demand for space cooling (with static cooling surfaces) (top: 03/2018-02/2019; bottom: 03/2019-02/2020)

Air conditioning system

The evaluation of the monthly energy demand for heating and cooling (and/or dehumidification) through the air conditioning system is displayed in Figure 13. While the total energy demand for heating decreased from 18,187 kWh/a to 7,151 kWh/a, the total energy demand for cooling (and/or dehumidification) decreased from 12,224 kWh/a to 2,496 kWh/a. The demand reduction can be attributed to the set value for dehumidification, the adapted operating schedule and the change of the control parameter from relative to absolute humidity.

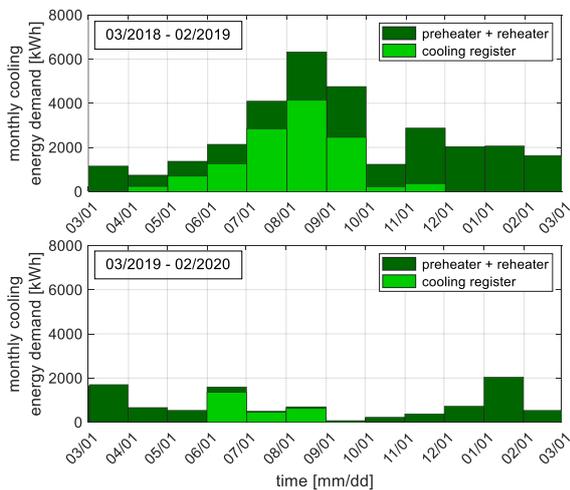


Figure 13: Monthly energy demand for the preheater and reheater and for the cooling register of the air conditioning system (top: 03/2018-02/2019; bottom: 03/2019-02/2020)

The distribution of the supply air temperature is shown in Figure 14 and the distribution of the relative humidity of the exhaust air in Figure 15. In both Figures the impact of the new defined set values are recognizable (e.g. dehumidification at 60%rH).

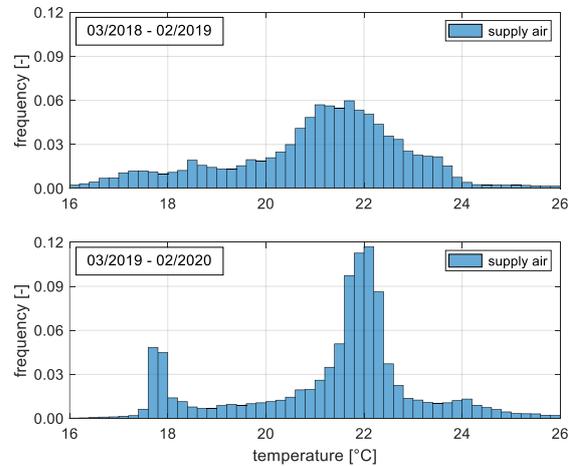


Figure 14: Distribution of the supply air temperature of the air conditioning system (top: 03/2018-02/2019; bottom: 03/2019-02/2020)

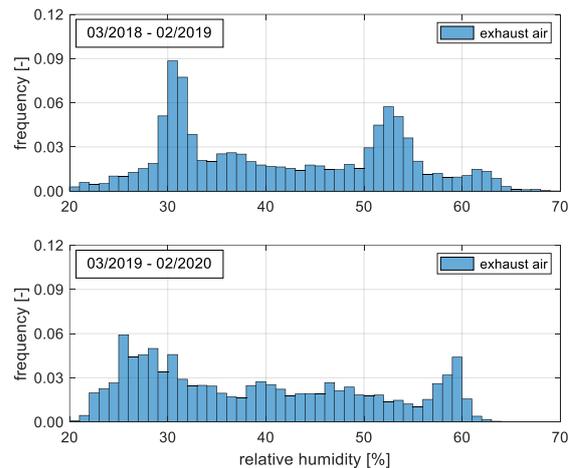


Figure 15: Distribution of the relative humidity of the exhaust air (top: 03/2018-02/2019; bottom: 03/2019-02/2020)

Electrical energy demand for lighting

To evaluate the control strategy for the external shading devices in terms of daylight utilization, Figure 16 compares the electrical energy demand for lighting the office rooms in the upper floor of the ENERGETIKUM (SIM 2; SIM 3; SIM 1/1 and SIM 1/2). Total electricity for lighting decreased from 1,267 kWh/a to 638 kWh/a. Possible reasons for this substantial reduction are a change of the room occupation and also the newly implemented control strategy for the external shading devices.

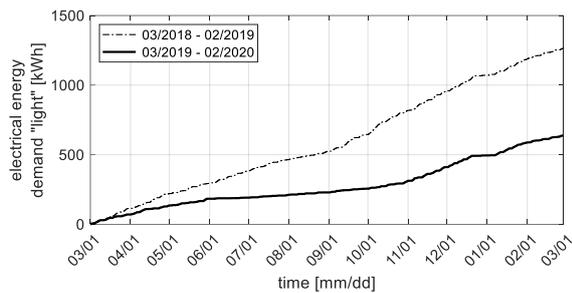


Figure 16: Integrated electricity demand for lighting the office rooms SIM 1/1; SIM 1/2; SIM 2 and SIM 3.

Total electrical energy demand

Finally the comparison of the total electrical energy demand (with and without the demand for the building's reversible heat pump) is shown in Figure 17. Due to the reduction of the energy demand for space cooling and for dehumidification/cooling of the supply air, the total electricity demand for the reversible heat pump also decreased, from 13,461 kWh/a to 6,145 kWh/a. Also, the electrical energy demand of all other energy consuming devices was reduced from 46,862 kWh/a to 43,150 kWh/a. The main aspect of this savings can be accounted for by a lower electricity demand by lighting, pumps and fans.

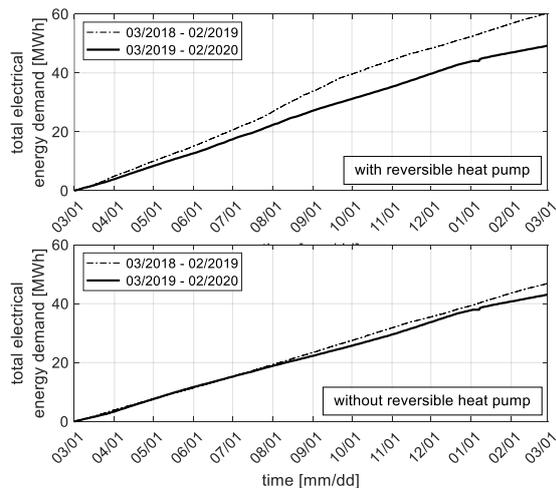


Figure 17: Integrated demand of electrical energy (top: with reversible heat pump; bottom: without reversible heat pump).

CONCLUSION

To identify the energy savings potential of an office building with glass façades and with static heating and cooling surfaces, an investigation was conducted on a living laboratory building (office building under real-life operating conditions). These investigations were prompted by a prior analysis of the operating behaviour of the different technical building devices with findings similar to that of Fuetterer et al. (2017) (cf. Waide (2013)).

The BACnet-OPC Matlab user interface developed as part of this work includes an intelligent control strategy of the external shading devices, a control strategy for the static heating and cooling surfaces and a control strategy for the hygienic air change in all thermal zones and was shown to be viable. Furthermore, the air conditioning system was manually optimized (changing of control parameters, set values, control variable, time schedule). The BACnet-OPC Matlab user interface has been operational for more than 18 months, controlling the above-mentioned technical building equipment in the living laboratory ENERGETIKUM under real-life operating conditions. The overall energetic impacts of the implemented measures are listed in Table 4.

Table 4:

Yearly energy demand and evaluation of the energy demand reduction

SYSTEM	03/2018 – 02/2019 [kWh]	03/2019 – 02/2020 [kWh]	Δ [%]
Space heating	17,463	18,726	+7.2
Space cooling	18,282	5,461	-70.1
Ventilation: preheater and reheater	18,187	7,151	-60.7
Ventilation: cooling register	12,224	2,496	-79.6
Electricity for reversible heat pump	13,461	6,145	-54.3
Electricity (without reversible heat pump)	46,862	43,150	-7.9

These long-term experimental investigations have demonstrated that the proposed control strategy can dramatically reduce the energy demand of the building and improve the thermal impacts of the building occupants' behaviour. In the next months, further investigations with an extended version of the BACnet-OPC Matlab user interface should clarify the energy savings potential of model predictive control algorithm (MPC algorithm) and also the demand side flexibility (grid connectivity) of the living laboratory building.

ACKNOWLEDGEMENT

This work has received funding from the Federal Ministry for Digital and Economic Affairs (BMDW) within the funding scheme COIN – "Network" (8th Call) managed by FFG under grant agreement No. 855979 (acronym "ZGEM") and the funding scheme COIN – "Aufbau" (capacity building) (6th Call) managed by FFG under grant agreement No. 856371 (acronym "EDMA").

REFERENCES

- Bernardo, H., Leitão, S., Neves, L., Rodrigues, P. 2010. Assessment of the energy savings potential of daylight utilization and its impact on a building energy performance, Third German-Austrian IBPSA Conference Vienna University of Technology, BauSIM2010, http://info.tuwien.ac.at/bausim/conftool/bernardo-2010-assessment_of_the_energy_savings_potential_of_daylight_utilization_and_its_impact_on_a_building_energy.pdf
- European Commission. 2018. Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency, Official Journal of the European Union, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0844&from=EN>
- Fütterer, J., Schild, T., Müller D. 2017. Gebäude-automationssysteme in der Praxis, Whitepaper RWTH-EBC 2017-001, Aachen, <http://dx.doi.org/10.18154/RWTH-2017-05671>
- Karasu, A., Steffan, C. 2010. Building energy performance simulations of the residential houses in mediterranean climate: case study for Bodrum, Turkey, Third German-Austrian IBPSA Conference Vienna University of Technology, BauSIM2010, http://info.tuwien.ac.at/bausim/conftool/karasu-2010-building_energy_performance_simulations-172.pdf
- Klanatsky, P., Plank, H., Heschl, Ch. 2019a. Die „smarte“ Fassade zur Optimierung des Energiebedarfs und thermischen Komforts. Präsentation. 23. Internationaler Wissenschaftskongress e-nova, Fachhochschule Burgenland GmbH, Studienzentrum Pinkafeld, Austria, 21.-22. Nov. 2019
- Klanatsky, P., Plank, H., Heschl, Ch. 2019b. Development of an innovative blind control strategy to increase the thermal comfort of an office building. 10th International conference: Indoor Climate of Buildings, ICB2019, Nový Smokovec, Slovakia, 8.-11. Dec. 2019
- Nasrollahi, F. 2010. Window area in office buildings from the viewpoint of energy efficiency, Third German-Austrian IBPSA Conference Vienna University of Technology, BauSIM2010, http://info.tuwien.ac.at/bausim/conftool/nasrollahi-2010-window_area_in_office_buildings_from_the_viewpoint-180.pdf
- Planas, C., Cuerva, E., Alavedra, P. 2018. Effects of the type of facade on the energy performance of office buildings representative of the city of Barcelona, Ain Shams Engineering Journal, Vol. 9, pp. 3325-3334
- Plank, H., Klanatsky, P., Veynandt, F., Stelzer, R., Traunmüller, W. 2019. Solar radiation as a building control parameter – A comparison of measured and predicted values. 10th International conference: Indoor Climate of Buildings, ICB2019, Nový Smokovec, Slovakia, 8.-11. Dec. 2019
- Sagerschnig, C., Seerig, A., Dietrich, C. 2010. Die Gebäudehülle als aktives Bauteil: Optimierung der Interaktion von Gebäudetechnik und Sonnenschutzsteuerung, Third German-Austrian IBPSA Conference Vienna University of Technology, BauSIM2010, http://info.tuwien.ac.at/bausim/conftool/seerig-2010-die_gebaeude_huelle_als_aktives_bauteil-129.pdf
- Tzempelikos, A., Shen, H. 2011. Daylighting and energy analysis of private offices with automated interior roller shades. Sol Energy, Solar Energy, Vol. 86, Issue 2; pp. 681-704
- Waide Strategic Efficiency, 2013. The scope for energy and CO2 savings in the EU through the use of building automation technology: Final report, 10 August 2013
- Westphal, F. S., Andreis, C. 2016. Influence of Glazed Façades on Energy Consumption for Air Conditioning of Office Buildings in Brazilian Climates, International Journal of Engineering Research and Application, Vol. 6, Issue 11, Part 1, pp. 54-60

REVIT2DALEC: A BIM2BEM COMBINED THERMAL AND DAY- AND ARTIFICIAL LIGHT ENERGY CALCULATION WITH DALEC USING THE MVD

J. Miller¹, F. Moser², J. P. Stumpf¹ and R. Pfluger¹

¹Energieeffizientes Bauen, University of Innsbruck, Innsbruck, Austria

²Baubetrieb, Bauwirtschaft, Baumanagement, University of Innsbruck, Innsbruck, Austria

ABSTRACT

Building Information Modeling to Building Energy Modeling can be seen as one solution for the performance gap of planned and operating buildings. Among other aspects miss calculations in the early design phase leads to energy demands are deviating in the operating building. With the combined thermal and day- and artificial light energy calculation tool DALEC, the BIM2IndiLight project is developing an early design stage simulations tool. By using open formats, validation layers and standardization combined with DALEC it is aimed to reduce the performance gap and develop a feasible tool for the AEC industry.

INTRODUCTION

During the last decades, new standards have been released for demanding higher energy efficiency for new and refurbished buildings. For instance, the German standard EnEV 2014 requires a building heat demand of under 50 kWh/m²a. Whereas in the upcoming Passivhaus standards, heat demand is required to be under 15 kWh/m²a (Passivhaus 2020). In contrast to the political developments, net building energy consumption has steadily increased since the early 1980s (Torcellini P. 2006). This is attributed to a continuous growing of the construction volume of 3,9 % each year worldwide. From 2015, an 85% construction volume increase until 2030 can be assumed (Global Construction Perspectives). Consequently, as the heat demand per building drops, the relative energy demand for artificial light significantly increases.

Within the BIM2IndiLight project it is held to implement DALEC in Revit for a combined thermal and day- and artificial light energy simulation in the early stage of the project progress. This provides the designer with a feedback about the building performance and helps making decisions during the designing process. Modification that are made during the construction phase, deviating from the early design stage of the project, have a significant impact on the operating building, since executing changes during the construction phase probably cannot fix later performance issues caused due to an insufficient design phase.

The Balance of light

It is currently well established that too little light exposure has a negative effect on people, with regard to physiological as well as psychological aspects. Therefore, it can be assumed that both heat and cooling demands are continuously decreasing by increasing insulation and by installing more and larger glazed areas. Better use of daylight might ask less of artificial light and by that decrease the demand of electrical energy. So far, the solutions sound easy, but in fact, they are not. Windows have a lower thermal transmittance resistance compared to walls. Therefore, an increase of the window to wall ratio (WWR) does not work without the “side effect” of a higher heating energy demand. Overheating might also be problem, when no proper shading device is implemented, or a control strategy runs unsatisfactorily. The appropriate window to wall ratio and insulation are requirements, but not yet a building design criterion. To come closer to the argument, Werner et al. (Werner 2017) put the criteria into a simulation attempt. A room with equator-orientated façade was exposed to 4 climate zones (5 cities – Stockholm Sweden, Berlin Germany, Wellington New Zealand, Las Vegas USA, Salvador Brazil); in the experiment using 2 different shading systems, external venetian blinds and daylight redirection systems by means of DALEC (DALEC 2020).

DALEC

DALEC (day- and artificial light with energy calculation) is a web-based combined thermal and day- and artificial light calculation tool. It was developed during the FFG project DALEC, by the university of Innsbruck, Bartenbach and Zumtobel. Individual façade concepts are hourly-based simulated and the impact on thermal and visual performance can be shown in less than a second, due to sophisticated and time-saving pre-calculations (Werner et al. 2017). The total energy demand is – by common sense -a combination of cooling, heating and artificial light. The simulation revealed, that the window area was to be optimized to gain the best result. Depending on the latitude, the optimal window to wall ratio ranged from 20 % to 70 %, resulted in monthly mean outdoor temperature, hours of sun per day and the sun angle of incidence. To take benefits from DALEC simulations

it is aimed to connect it to BIM for real-time design decision making.

BIM

In this regard, the building information model is a 3D model that includes geometrical and alphanumerical construction elements. Azhar (Azhar 2011) has demonstrated, that using BIM, improvements can be achieved, when it comes to interaction and time consumption or costs. It is also possible, that an automation of the modeling process might decrease human made errors. Further, it enables better post-processing for output representation (Kamel und Memari 2019). In order to make the most of an integral cooperation, the project participants should jointly access the model or individual partial models in the Building Information workflow. This cooperation can be achieved either with a "Closed BIM" or with an "Open BIM" method. In the former, all the necessary data for the process are exchanged in a closed data environment. The contributing partners are working on the same model due to manufacturer-specific interfaces. In contrast, an "Open BIM" approach does not use a specific software landscape.

BIM2BEM

Building Information Modeling (BIM) to Building Energy Modeling (BEM) is often seen as the key solution to increase the interaction between design and energy calculation process in order to design buildings with better energy performance, within the given time of the design phase. By using the building informations, created by a BIM tool, the integral planning approach is improved and e.g. energy simulations can be done by specific tools like EnergyPlus. If the simulation results can be reimplemented into the BIM tool, it's a bidirectional workflow, otherwise it's unidirectional

IFC

The IFC (industry foundation classes, ISO 16739) is defined by the buildingSMART International non-profit organization and is seen as the only non-proprietary BIM based data exchange format (Asmi 2015). IFC is an open and interoperable 3D building exchange format, supporting semantic, topology, properties, time, cost and schedule data.

MVD

Model View Definition (MVD) is a buildingSMART concept to validate the IFC by addressing exchange requirements during the Information Delivery Manual (IDM) process. The current version IFC4_ADD2_TC1 – 4.0.2.1 implements 776 entities defining objects, relations, values, quantities, properties, etc. The MVD breaks the IFC total schema down to a schema where just needed or necessary entities are in. Furthermore, it is used to validate the incoming model for all necessary informations.

STATE OF THE ART

As BIM is more and more adopted by the AEC (Architecture, Engineering, Construction) industry (Hardin und McCool 2015), a new challenge arises concerning BEM. Since buildings need to be more and more efficient, the influence of reliable energy results, comparing design and operating building (performance gap), is getting more important. When utilizing BIM as an input, there are different tools to realize building energy performance simulation, such as: EnergyBuilding, OpenStudio, Building Energy Analysis Model, GBS, Modelica/Dymola, TRNSYS, EnergyPlus, COMETH, IDA ICE, DOE2, eQuest, PHPP (via bim2PH) and more. These tools can be called BEM tools more or less since in research it is shown (e.g. Van Dessel (2019), Chen (2018) and Kota (2014)), that implementing exchanging BIM data still leads to several problems or big workarounds. These tools are classified into two groups. One group uses the US Department of Energy (DOE) engine, such as EnergyPlus, Revit Green Building Studio (GBS), eQuest, DesignBuilder and those that use their own engine (Gao 2019).

Interoperability Challenges

Gao et al. (Gao 2019) did a summary of IFC-based BIM to BEM approaches in different literature. Most of them are Revit or IFC-compliant BIM tool that creates IFC as an Input for EnergyPlus, EnergyPlus RIUSKA combination, EP and Radiance, EP and TRNSYS, PHPP, COMETH, OpenStudio, DOE-2.2.

However, most of these tools are not capable of importing IFC directly. Geometry has to be decomposed by tools like the Common Boundary Intersection Projection Algorithm (CBIP), Geometry Simplification Tool (GST) and be converted, e.g. to EP specific interface IDF. Besides, most of these approaches are not considering day- and artificial light for a combined thermal and light energy calculation. If they do, they mostly use Radiance for the light calculation. These processes are complicated, slow, need a lot of input informations and don't bring informations back into the BIM tool, hence their use is not really practicable outside research for the AEC industry, especially in the early design phase.

Literature has addressed the establishment and applicability of BIM-to-BEM workflows. Still, it is uncommon to achieve these workflows in industry due to numerous obstacles.

User-based Challenges

Over the course of design process, it is frequently observed that the planner has no time to run simulations locating the optimum for final energy demand. Furthermore, the loop of the designing process and energy simulations is frequently not closed. In addition, the planners are often overwhelmed by the amount of information and do not have the knowledge to interpret the results. Abu Hamra (AbuHamra 2015) presented via a case study that there exist many barriers to bring BIM into

utilization, the same can be said of the use of BIM to BEM:

- Lack of knowledge of how to apply BIM software
- Lack of architects/engineers skilled in using BIM programs
- Lack of the governmental regulations for the full support the implementation of BIM

In recent literature such as Kamel et al. (Kamel and Memari 2019) we find similar observations:

- BEM tools need to support all the attributes/information provided by BIM files and BIM file schemes need to define all the required information for energy simulations.
- Application of corrective middleware tools or manual process is needed to avoid data loss between two tools during data exchange.
- Although BIM file schemes (e.g. gbXML) could be capable of transferring all the required data for energy simulations, data might be missing during the data exchange between other tools.
- Introduction and development of standards for data exchange process.
- Comprehensive and proper error or warning messages need to be generated if the BIM file does not include the required information.

Having considered the challenges, the authors are now about to address them by several approaches. Still, the key challenge is the interoperability of data exchange.

Model Validation Challenges

Due to the exchange process, there is a data loss, an inconsistency during translation (e.g. language, designation, etc.) and missing data. Thus, three approaches that require different amount of efforts (Andriamamonjy 2019) can be presented:

1. An “integrated model” method, which links several models through a common data model.;
2. A “specific data sharing” method, which uses a custom information model to exchange information; and
3. A “generic data sharing” method, which prioritizes flexibility and, consequently, aims at being compatible with the large majority of software applications.

In this context, the third approach can be seen as the most reliable, as being highly robust to achieve interoperability with the use of IFC or gbXML (Asl, Mohammad Rahman et al. 2015). Third approach can be split into three solutions:

1. Proprietary tool-chain
2. Middleware tool
3. Exchange requirement identification

Proprietary tool-chain is an application programming interface (API) based solution and cannot be understood as an interoperable solution, since it just ensures the data exchange between the specific BIM tool and the other specific BEM tool (Andriamamonjy 2019). An API can be understood as the interface to a program. That way the developer can use the methods, functions and classes of a specific program without direct access to the original code. Even this approach is probably the most stable one, its main disadvantages are the inflexibility of working with other tools, not knowing complete exchange information and high costs.

Whereas middleware tools work with interfaces like IFC or gbXML, those can be exported by BIM tools, and convert them for the specific energy tool, while adding or manipulating data. During this process it can come to data duplications or information loss resulting in errors. Usually this approach is unidirectional (Andriamamonjy 2019).

Since there are just few restrictions to the IFC, requirements are quite variable, which might end up in data exchange challenges. Therefore, the third approach arises as the most promising one, which is exchange requirement identification and implementation in the IFC.

Exchange Requirements Challenges

Exchange requirements can be type of elements, information of elements, quantity determination, exchange formats and all of this specified for all participants. During the Information Delivery Model (IDM) all necessary exchange data is identified. These exchange requirements are defined by the client and the responsible project partners. It is defining which information at what phase of the project have to be delivered between different participants and the exchange format that has to be used. Within the Model View Definitions (MVD), the IDM is implemented in a strict IFC data structure that serves all the needs for the BEM tool (Pinheiro 2016).

In the literature several approaches can be found that use MVD. Baumgärtel et al. (Baumgärtel und Pirnbaum 2016) used the MVD to generate an ifcQL (query language). With the ifcQL, the ifcQL-processor is able to read, filter and change the IFC like a database. Since the project ended, unfortunately the program can't be accessed anymore. xBim Explorer (xBIM 2020) can be used to validate and filter the IFC with the MVD. xBim is an open source project that can be found and loaded on GitHub. With the xBim mvdXML plugin the IFC can be validated and filtered by the MVD. Even there is a high need in the AEC industry for IFC data checking and filtering by using MVD or queries, it is not well

examined in science literature as shown by Sattler (2019).

Also, there are commercial tools able to work with the MVD like Simple BIM or Solibri Model Checker, using the MVD in a project requires a high knowledge of the IFC. The MVD represents an abstraction of the IFC full schema that just includes the needed entities of the IFC for this specific exchange.

Most of the MVD studies published over the last few years still struggle with the amount of exchange requirements. Any participant during a construction project, and in every phase has an amount of information that needs to be delivered for calculations and simulations. Hundreds of needed exchange requirements are not unusual. Even if buildingSMART with the IFC is covering a lot of properties for objects in their standards, still most of these project properties are not covered. IFC solves this problem by giving the user the opportunity to create individual property and quantity sets (IfcPropertySet, IfcQuantitySet) and fill them with individual properties and quantities. It is also possible to generate specific elements, if they are missing in IFC schema (IfcBuildingElementProxy). Since every specific definition is a deviation from the standard, this leads to interoperability challenges. Considering this, as many IFC definitions as possible should be reused (buildingSMART 2020a).

DESIGN OF PLUGIN

Currently, it is not possible to work smoothly on a common BIM model within different software vendors. The models from the various programs are coordinated and exchanged together using the open format IFC. Bidirectional data exchange between BIM and BEM is not examined in since literature so far. In this paper a Revit to DALEC (BIM2BEM) bidirectional data exchange approach will be introduced. By using the MVD for validation and filtering and by using the freeBIM propertyserver for data standardization. This way a feasible approach for AEC industry is aimed.

freebim / ASI propertyserver

The ÖNORM freeBIM / ASI propertyserver, developed during the freeBIM-Project in collaboration with ASI (Austrian Standards International) as a part of the Austrian BIM-Norm, is an approach to help solving data exchange problems. For the users, this property server works as the basis for harmonized, standardized and machine-readable attributes in order to provide a clear standard for the parametric description of digital components. With the integration of the "bsDD (Build Smart Data Dictionary) GUID" (buildingSMART 2020b), all properties of the ÖNORM property server are clearly assigned with the bsDD making the data unique, multilingual and machine-readable. These properties are hierarchically structured and supplemented by further information such as data type, unit and IFC

property sets. The property server is implemented as a graph database. The graph database is illustrated to user during a hierarchical drop-down menu interface (Figure 1). The MMS data is stored and defined in the same way as it is used in everyday speech: (window) - HAS PARAMETERS - (width) - HAS DIMENSIONING - (real number [cm]) (freeBIM 2020; Fröch 2017; Fröch et al. 2019).

Herein, the BIM2IndiLight project needs properties for day- and artificial light simulations. Therefore the needed properties for building physics, shading systems, lightning systems and controlling are identified by the contributing partners, who are specialized in the mentioned topics, and their information are implemented on the "freeBIM Merkmalsserver".

The provided stock of information can then be used in future projects. The MMS is organized by different "libraries" in order to better differentiate objects and their parameters. By doing so, the database can be easily expanded, when it comes to integrate new standards or other product data. In order to connect the different characteristics of the libraries with each other, the possibility of "equality network relationships" is implemented.

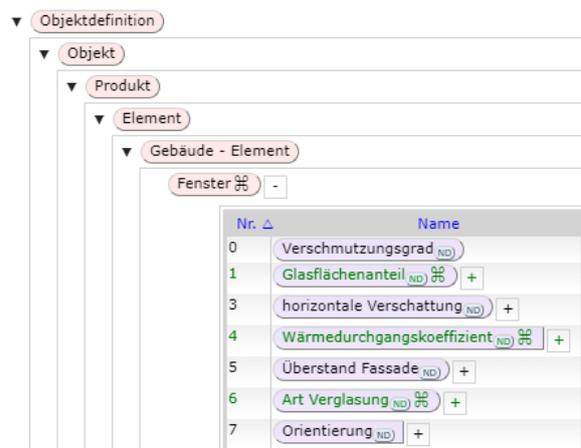


Figure 1: Properties on the freeBIM MMS (freeBIM 2020)

For further use, of the content from the property server, it is necessary to be integrated in a form in the BIM software. In a front-end, the characteristics can be structured and selected according to components and phases. The features that are not relevant for the user concerned remain hidden in this view and enable a clear overview. In order to transfer this information into the various applications, various tools were developed in the freeBIM-Project (freeBIM 2020 (Fröch et al. 2019)).

The Revit2DALEC plugin for Revit aims for the designing phase that can be split into 3 phases.

1. Conceptional design (shading system, cubature, orientation, window-wall-ratio, occupation type, building standard, construction method)
2. Pre-design (U-values, windows, rooms, room occupation type)
3. Late Design phase (artificial light system, individual settings for rooms,...)

DALEC Conceptional Design

DALEC plugin can be split into 2 (3) parts.

The first part is the DALEC Optimizer that includes the phase 1 and 2. By pre-selecting the occupation type, construction method, building standard, shading system and project location all needed information for the simulation are set by default. During an optimization process the designer gets a clear feedback for orientation and window-wall-ratio for the conceptional design. During this first part, a good knowledge of building physics is not explicitly necessary. Most of the DALEC settings are done by default and the user can play with different cubature's. The planner will get a clear and easy to understand result feedback to support well decision making.

DALEC Pre-Design

Proceeding with the conceptional design, the planner can now become more precise, with differentiation of rooms and room-occupation type, window size and position, shading elements, etc. Still most of the settings are set by default and the planner can focus on the design. Simulations are now getting more accurate. The planner can start the simulation manually and can check the energy results.

DALEC late Design

After the first two phases the model or rather project will be further developed by different disciplines like HVAC. Specific settings can now be made and simulated with DALEC Modeler. Within this stage the planner has a deeper knowledge of his/ her discipline and specific settings can be made for simulations. No optimization process will be performed automatically at this stage of progress any more, but can be started manually.

DALEC

DALEC has to be installed as a plugin on Revit, but the DALEC simulation kernel is running on a server and is accessed during an IFC exchange. Converged simulations can be then be reimplemented in Revit for result visualization as seen in figure 2. DALEC has a big amount of simulation results. Some can be visualized as a grid for each room, like daylight autonomy or illuminance. Others like yearly heat demand will be shown as graphs.

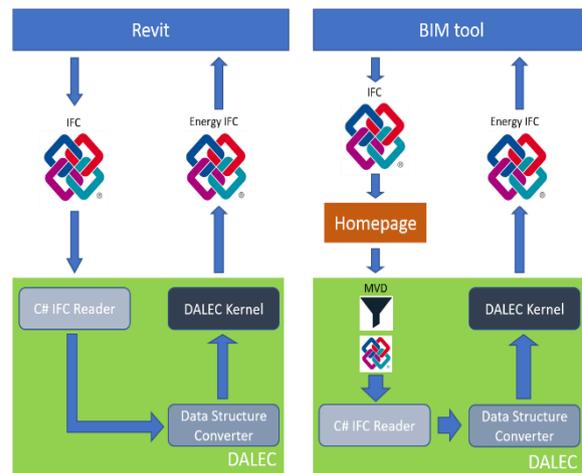


Figure 2: Revit 2 DALEC (left), any BIM tool to DALEC (right)

A validated DAELC IFC from Revit is exported due to 3 security instances or rather steps:

1. freeBIM MMS with standardized property sets and properties for IFC entities
2. Load property sets and properties from freeBIM MMS and enrichment of the specific Revit objects/ families
3. Revit IFC export mapping text file, for correct mapping of the properties into the IFC

The freeBIM MMS can be seen as the regulation instance, since even the MVD (Figure 2, right) is based on it (Figure 3).

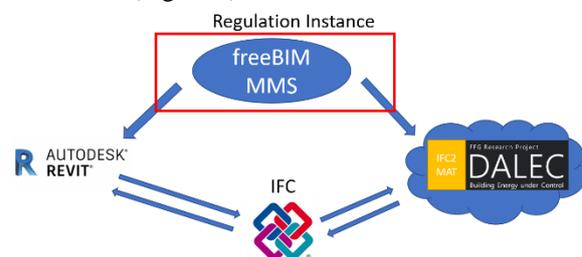


Figure 3: freeBIM MMS regulation instance

Getting properties into Revit

First step is carried out using one of the tools from the "freeBIM 2" (freeBIM 2020) research project. First, the shared parameter file is imported into Autodesk Revit, in which all the necessary properties of the property server are available. The shared parameter is a definition of a container for information that can be used in multiple families or projects [Autodesk.com]. These properties must be assigned to the objects in the BIM software. For this purpose, the object or family is selected in an additional tool - after selection, the category becomes visible in the tool (Figure 4).

Next step, using the hierarchical structure of the MMS, the parameters necessary for the evaluation, are easily added to the CAD objects/families with the tool. Using the hierarchical structure of the MMS, the features can be added to the objects/families in the

CAD. However, the properties are not automatically but manually linked to the internal parameters of the CAD software in Revit (Autodesk 2020), or the calculation of the individual values must be added. This way the building characteristics are filled with information (e.g. thickness, width, length of a wall).

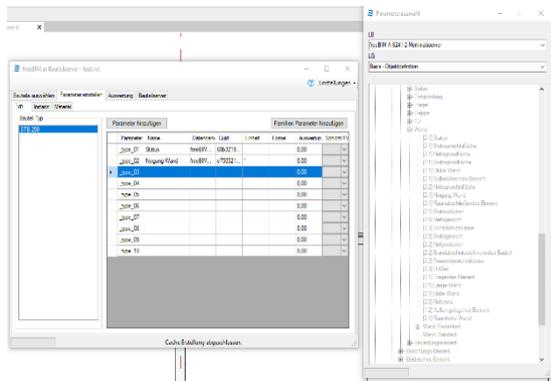


Figure 4: freeBIM MMS Tool Second Step (freeBIM 2020; Autodesk 2020)

The third step is executed by a manually written mapping text file, which can always lead to possible errors and is time consuming, when updates need to be done. Still, due to these steps it is not necessary to validate the IFC file, if it comes from Revit DALEC plugin. After simulations in DALEC are done, an "energy IFC" is sent back to Revit for integration of simulation results into the Revit model (Figure 2).

The energy IFC file does not have any geometrical information. Simulation results are connected to the corresponding spatial structures due to the GUID and name information. "The generated GUID is compressed for exchange purpose following a published compression function. The compressed GUID is called "IFC-GUID" here." (buildingSMART 2020b). Most of the visualized results are grid-based information like the illuminance or daylight autonomy. These information's are saved in the IfcGrid entity. The IfcGrid is mapped to the grid of Revit spaces by the Revit API. With this approach the amount of data and the communication time can be reduced. Furthermore, the probability of errors and duplication of data is avoided.

DALEC Kernel

DALEC as a server-based application is built on 3 instances, as follows:

- The first instance is a C# written IFC reader using the xBim class library
- Second instance converts the C# data structures into Matlab MathWorks MWStructure
- Third instance starts DALEC as Matlab compiled .NET assemblies (dll class files) that can be executed inside the C# code

For the result export, the 3 instances are going backwards as it seems to be, but instead of the reader there is a simple IFC writer. Since the BIM2IndiLight project aims to overcome the interoperability challenges, it is not meaningful to just rely on Revit. The DALEC server application can also be accessed with a manual IFC upload by using the homepage (Figure 2, right). That way it is possible to calculate models even when they are not from Revit. For this variant the workflow does look quite different and needs a different way of ensuring data interoperability.

MVD-based validation

If IFC data comes from another source than the REVIT DALEC plugin, then there is a high chance of missing or getting unnecessary information. To avoid a program crash, the file needs to be validated. By using IfcDoc, an MVD creating program from buildingSMART (Figure 5), a model view "DALEC" mvdXML file is generated and used for the validation and filtering. While working with the Revit DALEC plugin, interoperability for Revit to DALEC can be ensured without an MVD validation.

For IFC validation and filtering the xBim/mvdxml library is used. If it does fail, xBimXplorer and its mvdXML plugin can be used for further information.

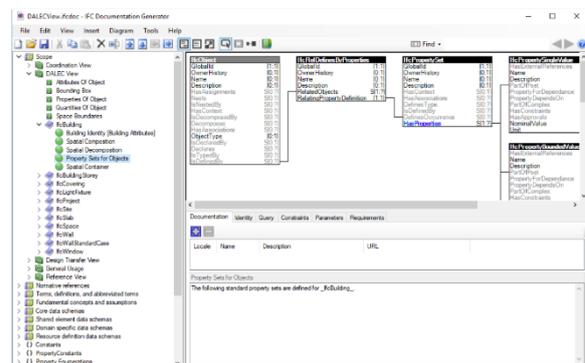


Figure 5: IfcDoc (buildingSMART 2020c)

Only if all checks for every building element of the incoming IFC are passing, DALEC server application will be accessed and started. Otherwise it will be stopped and the user will be prompted to check the logs and update his model.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

It is important to highlight that this work is still in progress, several tools and workflows have been tried, but are not finished so far. Some of the approaches have shown great potential to be further developed in the future. Some approaches could not be further pursued since support is stopped, and others did not match studies conditions. Three main conditions have emerged, firstly, it should be state of the art. Secondly, it should be feasible for planners in the early design phase. Finally, it is good to work with existing solutions as much as possible and use open-source libraries. Working on and with the various workflow approaches, challenges have shown up.

IfcDoc (buildingSMART 2020c) is currently the only MVD creating tool. The latest release v12.2 10th September 2019 suffers from numerous issues. It was not possible to export a functioning mvdXML that matched the requirements for a full validation. Properties are not exported, while using export Version of mvdXML v1.1, but using v1.2 is not supported by any tool so far. The MVD should solve the problems of interoperability by checking for standardization. IfcDoc gives the user a lot of different opportunities to build up a MVD, starting by names for Concepts and Exchange Requirements and creating schemas.

Depending on the individual created mvdXML file, informations can end up in different tags. All that influences the outcomes of the mvdXML and can cause difficulties while using mvdXML's in different tools. During the paper it was decided to build up a MVD that is working for the xBim/mvdXML Validation test, since it is open source and the library is up to date. However, in order to achieve a working IFC validation, it was still necessary to extend the mvdXML manually by adding parameters.

In this first attempt, it was aimed to finish a running version from Revit to the current version of DALEC. For DALEC 64 properties were detected and only 25 values were already existing in the buildingSMART standards, while 39 are missing. Also, 17 property sets are needed in which 15 exist already and 2 are missing. The missing properties and property sets are documented on the freeBIM Merkmalsserver and the DALEC MVD. Manually mapping Revit parameters to IFC, results into human-based errors. Due to the amount and variety of properties, properties can be identified as the largest "trouble makers". With the tools from the "freeBIM 2" project it is possible to map properties from the Merkmalsserver to Revit objects. This workflow still needs to be optimized, since a high amount of manual settings is needed. This can produce errors. Furthermore, the properties from Revit have to be mapped to the IFC file by a text (txt) mapping file. It is also human written and will be automated with the Merkmalsserver. Since everything starts with the freeBIM MMS and is based on it, it is necessary to compare and define the clear and standardized attributes of the MMS with the existing IFC structure (e.g. parameter MMS - "external component" - IFC 4 - "is external"). As a result, the content of the characteristics is in the right place in the IFC file and can be further processed. All of this enables an error-free data comparison of the internal CAD-parameters with that of the property server.

Even when the MVD approach is quite common as seen in the literature and though more and more companies are starting to work with the MVD, it is

crucial to underline, that without a good knowledge of the IFC schema, IfcDoc and the skill to master complications, the number of failures can be still big. It might be the reason, why MVD is not very common in practice, as we got feedback from project partners and companies. Nonetheless MVD is a promising in future. The freeBIM MMS is a partial image and extension of the entire IFC schema. Since there were some challenges with the MVD from IfcDoc, it is considered to autogenerate an MVD from the server. This will reduce human made errors, and the MVD will be easy to update, when changes in the freeBIM MMS requires it. Another approach will be the use of the freeBIM MMS directly as a "like" MVD to validate and filter the IFC.

With IfcBuilding, IfcShadingDevice and IfcEnergyConversionDevice missing in Revit, another problem appears that needs to be solved. There are no properties for IfcBuilding in Revit provided. Property mapping does not work with the IfcProject properly. Further, IfcShadingDevice and IfcEnergyConversionDevice are not supported under Revit.

Overall, several challenges are still existing and need to be addressed. The property standardization with the freeBIM MMS is a constant ongoing process. Even tools for mapping properties from freeBIM MMS to Revit exist, they need to be optimized in context of usability. Furthermore, the property mapping process can be split into three parts:

1. freeBIM MMS to Revit
2. IFC entites to Revit families
3. Revit properties to IFC export properties

All three of them still needs more or less further developments. Exported mvdXML files from IfcDoc are incorrect and need handy adjustments for xBim validation. And also, DALEC is in an evolution process for BIM adaptation.

REFERENCES

- AbuHamra, Lina Ahmed Ata (2015): „An investigation into Building Information Modeling (BIM) application in Architecture, Engineering and Construction (AEC) industry in Gaza strip". Islamic University of Gaza (IUG), Gaza. Higher Education Deanship Faculty of Engineering Civil Engineering Department Construction Project Management.
- Andriamamonjy, Ando et al. (2019): "A combined scientometric and conventional literature review to grasp the entire BIM knowledge and its integration with energy simulation". In: Journal of Building Engineering (22), S. 513–527.
- Asl, Mohammad Rahman et al. (2015): "BPopt: A framework for BIM-based performance optimization". In: Energy and Building (108), S. 401–412.

- Asmi, Emira El al. (2015): "A standardized approach to BIM and energy simulation connection". In: *International Journal of Design Sciences and Technology* (21 (1)), S. 59–82.
- Autodesk (2020): Autodesk. Hg. v. Autodesk. Online verfügbar unter <https://www.autodesk.com/>.
- Azhar, Salman (2011): Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. In: *Leadership Manage. Eng.* 11 (3), S. 241–252. DOI: 10.1061/(asce)lm.1943-5630.0000127.
- Baumgärtel, Ken; Pirnbaum, Stephan (2016): Automatisierte Prüfung und Filterung in BIM mit model View Definitions. In: 28. Forum Bauinformatik 2016.
- BIMserver (2020): BIMserver 2020. Online verfügbar unter bimserver.com.
- buildingSMART (2020a): IFC Documentation. Hg. v. buildingSMART. Online verfügbar unter <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc>.
- buildingSMART (2020b): IFC Guid. Hg. v. buildingSMART. Online verfügbar unter <https://technical.buildingsmart.org/resources/ifcimplementationguidance/ifc-guid/>.
- buildingSMART (2020c): IfcDoc. Online verfügbar unter <https://technical.buildingsmart.org/resources/ifcdoc/>.
- Chen S., Jin R., and Alam, M. (2018). "Investigation of Interoperability between Building Information Modelling (BIM) and Building Energy Simulation (BES)." *International Review of Applied Sciences and Engineering*. 9(2), 137-144. DOI: 10.1556/1848.2018.9.2.9
- DALEC (2020): Building Energy under Control. Innsbruck. Online verfügbar unter <http://dalec.uibk.ac.at/>.
- freeBIM (2020): freeBIM 2020. Online verfügbar unter freebim.at.
- Fröch, Georg (2017): Merkmalsserver als Kommunikationsmittel für die Bauwirtschaft. In: Gisela M. Gary (Hg.): *BIM - digitale Revolution und ihre Grenzen*. Wien: Linde (Immobilienwirtschaft Edition), S. 73–89.
- Fröch, Georg; Gächter, Werner; Tautschnig, Arnold; Specht, Günther (2019): Merkmalsserver im Open-BIM-Prozess. In: *Bautechnik* 96 (4), S. 338–347. DOI: 10.1002/bate.201800092.
- Gao, Hao et al. (2019): "Building information modelling based building energy modelling: A review". In: *Applied Energy* (238), S. 320–343.
- Global Construction Perspectives: *Global Construction 2030*. Online verfügbar unter <https://www.globalconstruction2030.com/>.
- Hardin, Brad; McCool, Dave (2015): *BIM and construction management. Proven tools, methods, and workflows*. Second edition. Hoboken, NJ: Sybex a Wiley brand. Online verfügbar unter <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&AN=1000748>.
- Kamel, Ehsan; Memari, Ali M. (2019): Review of BIM's application in energy simulation: Tools, issues, and solutions. In: *Automation in Construction* 97, S. 164–180. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.11.008.
- Kota, Sandeep et al. (2014): Building Information Modeling (BIM)-based daylight simulation analysis. In: *Energy and Buildings* 81 391 - 403
- Passivhaus (2020): *Passivhaus 2020*. Hg. v. Passivhaus. Online verfügbar unter <https://passivhaus-austria.org/content/faq>.
- Pinheiro, Sergio et al. (2016): "Model View Definition for Advanced Building Energy Performance Simulation". In: *CESBP/BauSIM Conference Dresden, Berlin*.
- Sattler, Léa et al. (2019): Interoperability aims in Building Information Modeling exchanges: a literature review. In: *IFAC conference*
- Torcellini P. (2006): "Zero energy buildings: a critical look at the definition". In: *Conference paper of the 2006 ACEEE summer study*.
- Van Dessel, Megan et al. (2019): BIM to Building Energy Performance Simulation: An Evaluation of Current Transfer Processes. In: *16th IBPSA*
- Werner, Matthias; Geisler-Moroder, David; Junghans, Bert; Ebert, Oliver; Feist, Wolfgang (2017): DALEC – a novel web tool for integrated day- and artificial light and energy calculation. In: *Journal of Building Performance Simulation* 10 (3), S. 344–363. DOI: 10.1080/19401493.2016.1259352.
- Werner, Matthias et al. (2017): "Analysis of Worldwide Performance of Façade Systems". In: *Conference Paper Building Simulation 2017*.
- xBIM (2020): xBIM Explorer 2020. Online verfügbar unter <http://docs.xbim.net/downloads/xbimexplorer.html>.

POTENTIAL ENERGY SAVING VIA DYNAMIC SHADING WITH ELECTROCHROMIC ELEMENTS IN ETFE WINDOWS

J. Cremers¹, H. Liebhart¹ and D. Mirbach¹

¹Hochschule für Technik Stuttgart, Stuttgart, Germany

ABSTRACT

In this article we report on our investigations on the impact of dynamic shading, integrated into ETFE fenestration elements, on the energy demand of buildings, via numerical simulation. The numerical investigations are carried out with the dynamic building simulation suite TRNSYS. The dynamic shading mechanism is based on electrochromic elements. The modelling of the electrochromic dynamic shading mechanism is based on data from commercial as well as newly developed elements. We explore the general potential for the reduction in overall energy demand in relation to various switching algorithms. The influence of the switching algorithm is explored by employing the optimization tool GenOpt.

INTRODUCTION

The use of ETFE in architectural context for fenestration, facade or roof elements is gaining greatly in popularity. Apart from its advantages in aesthetics and weight, ETFE also bears some shortcomings in terms of its thermophysical properties concerning heat retention, in comparison to regular insulation glazing units (IGU). In various preceding research projects our Institution has spent reasonable effort on the investigation and improvement of the thermo physical properties of ETFE elements for the building envelope. In the past different approaches, like for example angle of incident dependent selective shading (Cremers & Marx 2017) and low emissivity coatings (Follow-e2) have been tackled. Other concepts like pneumatic operated position switching of inversely complementary printed layers have been investigated by others (Flor et al. 2018). In this work we address the impact of dynamic shading by means of electrochromic elements on the energy demand of a building in the context of ETFE membrane architecture.

The reported investigations are conducted by means of numerical simulations, employing the dynamic building simulation program TRNSYS. It seems noteworthy to point out that the thermophysical processes within an ETFE cushion, with regard to heat transfer, differ somewhat to the relevant processes

within regular IGUs. Some thermo physical effects regarding the heat transfer through the cushion and the proper modelling of them will therefore be discussed in our work. The article is structured as follows:

In the first section, “HEAT TRANSFER IN ETFE CUSHION”, we address the fundamental thermo physical phenomena with regard to fenestration elements in general and tackle the peculiarities of heat transfer processes within pneumatic ETFE elements, as well as their proper numerical modelling.

In the subsequent section, “NUMERICAL SIMULATION” we introduce the numerical tools and models utilized for the investigations.

In section “RESULTS AND ANALYSIS” we present the results of our investigation and discuss the impact of our findings.

Finally, in the last section, “SUMMARY AND OUTLOOK”, we present a synopsis of the conducted efforts and elaborate on future prospects.

HEAT TRANSFER IN ETFE CUSHIONS

Heat transfer processes are generally driven by the temperature gradient across a medium due to the presence of energy wells and sinks in the vicinity. In the case of transparent building elements the incident radiation and radiation transfer phenomena like reflection, absorption and transmission are of increased significance for the heat transfer processes and energy balance of a building. An overview of the spectral distribution of radiative energy of the incoming solar radiation in terms of the spectral irradiance of the AM1.5 spectrum (according to ASTM G173-03(2012)) as well as the photopic luminosity function $V_M(\lambda)$ of human vision (according to the CIE (Vos 1978)) and the spectral thermal blackbody radiation, emitted at a temperature of $T = 300$ K, is shown below in Figure 1.

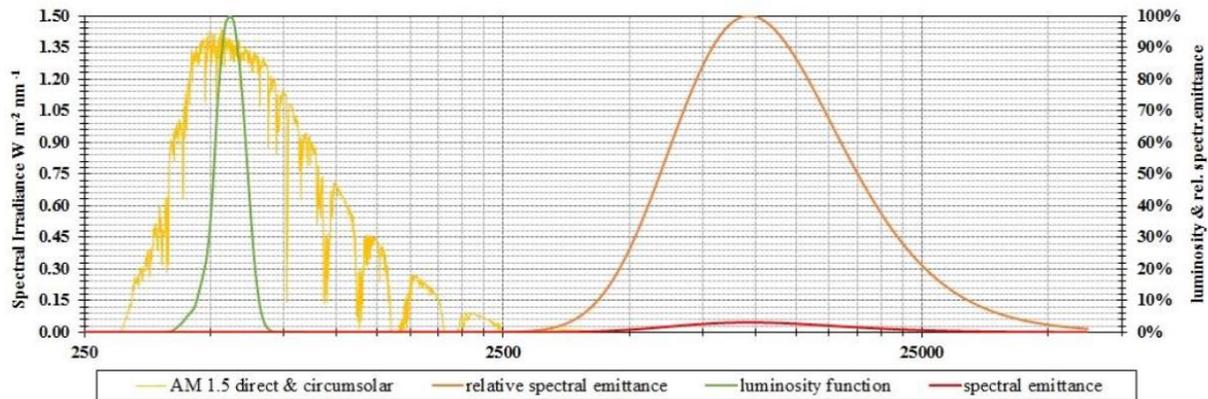


Figure 1: Spectrum of solar irradiation, luminosity function and thermal blackbody radiation.

The ratio of the overall solar radiative energy in the various spectral regions (ultraviolet UV, visual vis, infrared IR) is given below in Table 1.

Table 1:

Radiative energy ratio in specific spectral regions.

	UV 280 – 380 nm	VIS 380 – 780 nm	IR 780 – 4000 nm
Energy Fraction	2.29%	52.06%	45.65%

According to the distribution of the radiative energy to the specific spectral ranges, it should theoretically be possible to block about 48 % of the incoming radiative energy without inducing any constraints on the visual experience within the building. While conventional shading elements are typically opaque in all spectral ranges, the spectral properties of electrochromic shading elements can generally be tailored to some degree, enabling the fenestration element to retain its functionality to provide a line of sight to the outdoors to a certain degree.

The rate of energy transfer across building elements is specified by certain well-defined coefficients like the U-value for the thermal transmittance through opaque, as well as transparent elements, e.g. walls, ceilings, roofs, floors, windows and doors, and the g-value (solar heat gain coefficient - SHGC) for the overall heat transfer rate, caused by incident solar radiation including secondary heat transfer effects through transparent elements, e.g. fenestration and glass doors. The methods for the calculation and measurement of these coefficients are well-defined and documented in technical standards and regulations (e.g. DIN ISO 6946, DIN 673, DIN 410) and are well established for ordinary building elements. These Standards were designed for the characterization of building elements within a specified set of boundary conditions to provide comparability of different building elements. It is noteworthy to point out, that there are some non-negligible deviations between the calculations following different norms i.e. ISO 15099 and DIN EN 673. This has already been discussed by others (Hanem et al. 2014) and will not

be further elaborated on in our endeavors. In the current work we will conduct calculations according to the standards, common in the German context, i.e. DIN EN 673 and DIN EN 410, for U-value and g-value respectively.

According to the Standard DIN EN 673 the boundary conditions of the calculations are chosen in a way to comparably reproduce the heat transfer processes within a vertical, plane parallel, multi pane glazing unit, at a given temperature difference. It needs to be addressed, that the occurring physical phenomena inside an ETFE cushion element differ to a significant degree in their magnitude from the corresponding phenomena inside a regular multi pane glass window. The general thermo physical phenomena within a membrane cushion are depicted below in Figure 2.

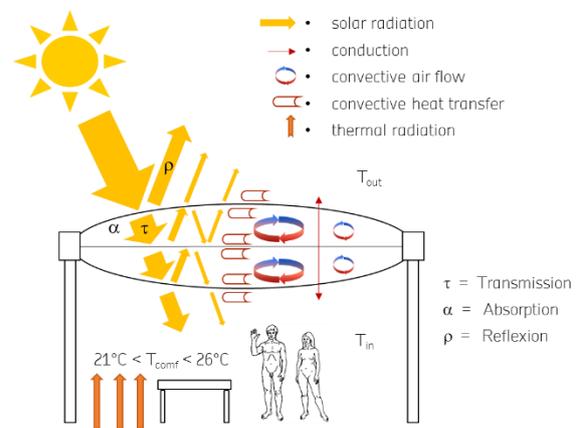


Figure 2: Heat transfer phenomena within cushion.

While the depicted general heat transfer processes, conduction, convective flow and radiation, occur likewise in ETFE-cushions and IGUs, their impact on the magnitude of the heat transfer rates differ to some degree. Especially the convective heat transfer at the inner surfaces in IGUs is considered a minor effect, due to the smallness of the interplanar gap, typically calculated with a rather simple temperature driven routine, neglecting airflow velocity within the cavity. The manifold of deviations in the impact of the various heat transfer phenomena arise mostly from

constructional differences between membrane cushion elements and regular multi pane glazing units. Some rather obvious differences and their treatment are listed below and will be addressed in the further discussion.

The major deviations of membrane constructions from the requirements by the standards are:

- the orientation of the ETFE element. Since they are commonly applied to constitute curved building envelopes and roofs, the orientation is mostly not vertical.
- The obvious departure from plane parallelism of the boundary surfaces. Due to the flexible nature of the material the surfaces are generally not plane parallel but curved and tilted.
- The airflow within the cushion. Due to the comparably large gap between the panes, the temperature difference induces considerable air movement of streams and vortices inside the cushion with subsequent impact on the convective heat transfer processes.

Due to these differences, calculations of the U-value as well as the g-value, according to the common standards, are not entirely applicable to typical cushion constructions, since some relevant phenomena, like for example the airflow within the cushion, are typically not sufficiently taken into account by the standards. Comparability between the calculated values for ETFE cushions and IGUs is therefore not provided, strictly speaking. Due to the lack of calculation standards for irregularly shaped fenestration elements, the U-value and g-value is still mostly calculated according to the standards for regular fenestration elements. In our following remarks we try to point to resolutions to some of the shortcomings in the calculations according to the standards and give some prospects with regard to the proper numerical handling of the relevant thermo physical phenomena within ETFE cushions.

The probably most significant and most laborious to account for property seems to be the internal airflow and its influence on convective heat transfer processes on the inner surfaces. The airflow within regular fenestration elements is mostly negligible and therefore justifiably accounted for by rather simple models. These calculations are driven by the temperature difference and deal with natural convection via dimensionless parameters, i.e. the Nusselt-, Prandtl- and Grashof-Number, without taking flow velocity explicitly into account. Due to the significantly bigger gap between the boundary planes and the corresponding higher amount of air volume, air movement within cushion elements gains greatly in relevance. The phenomena of temperature driven fluid flow within ETFE cushion elements has been investigated previously by means of Computational

Fluid Dynamic (CFD) calculations (Antretter 2008, Jianhui 2015). Calculations of that nature are of great value for the assessment of the impact of fluid flow within the cushion on the convective heat transfer processes for fixed thermal boundary conditions. Calculations of transient conditions are however mostly not feasible since CFD calculations are notoriously time-consuming. A straight forward coupling of dynamic building simulations and CFD calculations seems therefore prohibitive. Since a converged numerical CFD solution would have to be produced for each time step of the building simulation. Simplified procedures for the implementation of CFD solutions into transient building simulations will be addressed in future works.

The obvious difference in the geometric configuration of the surfaces, due to the generally complex curvature of the flexible material, can be tackled with the rather straight forward crude procedure of approximating the curvature as adjacent elements of different width/height, and merging the single U-values to an overall U-value.

With regard to the g-value a proper numerical treatment of the influence of the curvature on the radiative heat transfer and optical properties of a cushion would require a rigorous ray tracing calculation to handle effects like haze, scattering and diffraction properly. Investigations on the thermal and optical properties of ETFE cushions employing ray tracing routines and the coupling to dynamic building simulations have been done by others (Flor et al. 2018).

In the transfer from theoretical modelling to simulation application the degree of sophistication in the numerical models is bound to the capabilities and constraints of the simulation suite on the one hand and available computational recourses on the other hand. It is therefore mostly not realizable to implement the theoretical modelling to full extent. The identification of the relevant phenomena and their impact on the calculation is still helpful to evaluate shortcomings and the outcome of numerical simulation and take them with an additional grain of salt.

NUMERICAL SIMULATION

In this section we describe the methods, used for the numerical investigations of the influence of electrochromic shading on the energy demand of a building, in some detail. The investigations are part of the scope of the ongoing, federal funded, research project "Flex-G", conducted in close collaboration with manufacturers and several other research institutions. The numerical work was conducted by employing a number of available computational tools and some newly created scripts for executing and controlling the simulation. The general workflow and the computational tools applied in the numerical

investigations on the topic are depicted below in Figure 3.

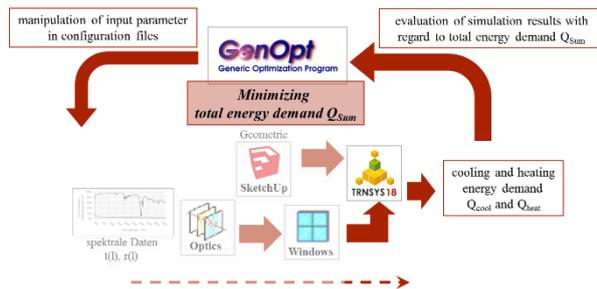


Figure 3: Workflow of the numerical simulation within optimization loop.

The dynamic building simulation was done with TRNSYS18 on the model of a generic building created with SketchUp 2017. The input data for the fenestration elements was created from spectrometric data, which was either provided by the manufacturers and collaborators, in case of the electrochromic elements, or was retrieved by spectrometric measurements at our institution, in the case of the ETFE polymer. The tool of choice, for the creation of comprehensive fenestration datasets for TRNSYS, was the free software suite Optics and Window from Berkeley Lab. The optimization routine, to solve the minimization problem with regard to the overall energy demand in relation to the switching parameters, was GenOpt from Berkeley Lab. In order to achieve some additional automation a number of command scripts were composed.

The goal of the optimization routine is to find a minimum of the overall yearly energy demand of the building by adjusting the shading parameters of upper and lower limit of external illumination for the switching algorithm as well as the shading factor itself. The optimization routine is employing a set of heuristic methods, like genetic algorithms, to find the minimum in the energy demand. It is, by the nature of the heuristic optimization method, not possible to ensure the identification of the global minimum. Although there are certain randomized procedures in place, to enable the routine to overcome local minima, the found optimum should be considered as local minimum.

We ran several scenarios of optimization. Two major scenarios will be discussed here. In the first scenario, henceforth referred to as “year specific optimization”, the shading parameters (upper and lower limit as thresholds for the switching and the shading factor) are set for a whole year. In the second scenario, from now on regarded as “month specific optimization”, the shading parameters are month specific and are adjusted each month.

Throughout all simulations we used the weather data file for Stuttgart, included in the TRNSYS data system. The temperature boundaries for the heating

and cooling of the building are set so the room temperature will be kept in a comfortable range and does not drop below 20 °C and not rise above 26 °C, without any limitation on heating and cooling power consumption. The time step for the simulations is one hour and the overall time span ranges across one year. The convective heat transfer processes at the inner and outer surfaces were treated with the internal calculation routine of TRNSYS. Within this framework we investigated various building and switching configurations of which some will be introduced below.

In order to get a general impression on the capabilities of dynamic shading, the initial simulations were done on the rather generic building model depicted in Figure 4.

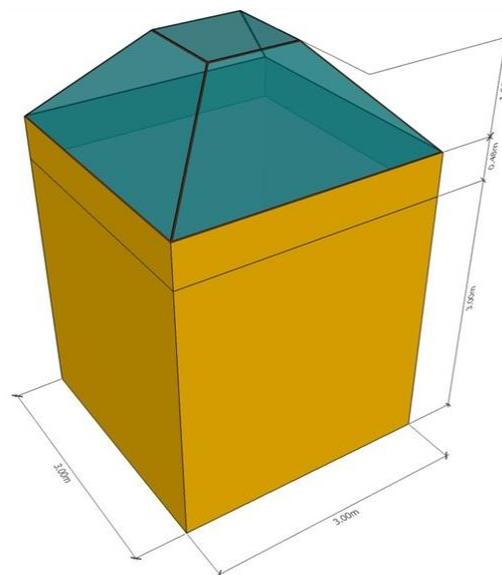


Figure 4: Generic building model with transparent roof for numerical simulation.

The generic building represents a rather oversimplified model of a field test setup, somewhat comparable to the one investigated within the Project Optima (Kaufmann 2007), than an actual building. The pneumatic cushion covers the whole roof. While this is a rather common configuration in membrane architecture e.g. for covering atria, this configuration was mainly chosen due to limitations of the building simulation tool TRNSYS in modelling transparent multi layered roof structures. The cushion itself is modelled as static and pneumatic stabilization mechanism e.g. pumps are being omitted. These simplifications were chosen to only illustrate the general correlation of energy demand and dynamic shading and the optimization routine. Further investigations on models, representing actual buildings, like a factory hall with light band roof fenestration are also in progress but will not be presented here for the sake of brevity.

The model introduced here is represented by a cube with dimensions of 3 m x 3 m x 3 m. The roof consists of a triple layered transparent construction with a curvature approximation of the outer layer of an ETFE cushion and a plane parallel middle and inner layer. The three layers of transparent roof elements were configured as fenestration components in TRNSYS, employing material data of 200 μm thick ETFE foil for the window data files. The shading mechanism was realized on the middle layer with the shading option implemented in TRNSYS. The switching of the shading is triggered by the external radiation within an upper and lower limit.

In the second configuration we implemented fenestration data into TRNSYS which was derived from spectroscopic data of two real electrochromic devices provided by project partners. The optical properties in terms of transmission, absorption and reflection coefficient in the solar and visual spectral range ($T_{\text{sol/vis}}$, $Abs_{\text{sol/vis}}$, $R_{\text{sol/vis}}$) and heat transfer properties in terms of U-value and g-value of both systems, as derived from the spectral data with the tools Optics and Window are given below in Table 2.

Table 2:
Optical and heat transfer properties of electrochromic elements.

name	T_{sol}	Abs_{sol}	Rf_{sol}	T_{vis}	Abs_{vis}	Rf_{vis}	$emis_f$	SHGC	U-value
econtrol-I-raw_matr_cen	0,494	0,433	0,073	0,595	0,357	0,048	0,84	0,675	5,44
econtrol-II-raw_matr_cen	0,346	0,578	0,076	0,439	0,511	0,05	0,84	0,59	5,44
econtrol-III-raw_matr_cen	0,248	0,678	0,08	0,33	0,617	0,053	0,84	0,535	5,44
econtrol-IV-raw_matr_cen	0,171	0,751	0,084	0,24	0,705	0,055	0,84	0,491	5,44
econtrol-v-raw_matr_cen	0,074	0,837	0,096	0,116	0,821	0,063	0,84	0,434	5,44

name	T_{sol}	Abs_{sol}	Rf_{sol}	T_{vis}	Abs_{vis}	Rf_{vis}	$emis_f$	SHGC	U-value
eelicon_I_raw_cen	0,341	0,512	0,146	0,484	0,398	0,118	0,9	0,563	5,88
eelicon_II_raw_cen	0,2	0,498	0,112	0,259	0,639	0,102	0,9	0,502	5,88
eelicon_III_raw_cen	0,204	0,587	0,092	0,144	0,762	0,094	0,9	0,514	5,88

The first electrochromic system is a commercially available system for multi pane glass windows by e-control with five stages of switchable shading which will be referred to simply as ECONTROL. The second system is a polymer based system with three shading stages, which emerged from a previous research endeavor by one of our project partners, simply referred to as EELICON.

The switching, between the different stages, is implemented into the TRNSYS simulation by conditional equation elements controlling the window ID, depending to the external irradiation on the outer surface. In addition to the temperature control via heating and cooling several auxiliary loads and gains have been introduced into the simulation, to approximate a more realistic usage scenario.

These additional loads, gains and boundaries of the simulation are listed below.

- Scheduled occupation by inhabitants from 8:00 to 18:00 o'clock, Monday to Friday.
- Scheduled thermal load by technical equipment from 6:00 to 18:00 o'clock, Monday to Friday.
- Scheduled thermal and electrical load by dynamic artificial lighting during occupation. With a dynamic daylight control algorithm to provide illumination of minimum 300 lux inside, 1 m above floor level.
- Allowing the room temperature to drop to 16 °C at times without occupation.
- Constant natural infiltration with a fixed air change rate set to 0.6 h⁻¹.

The overall energy balance takes all these loads and gains into account and does also account for the energy demand of the switching processes of the electrochromic elements. The value for the energy demand of the electrochromic elements was derived from data of a laboratory set up and might deviate up to one order of magnitude to the energy demand of commercial products. Still, this energy demand is fairly low and does not have a significant impact on the overall energy demand, as we will demonstrate in the discussion of the results. The shading rate of the

different stages of the electrochromic elements is given by their optical properties, therefore the optimization routine has no influence on the shading factor itself and only manipulates the stage specific thresholds for the switching routine.

RESULTS AND ANALYSIS

In this section we display and discuss the results of the simulations and optimization processes. We compare the energy demand of the unshaded state, where all window panes consist of transparent ETFE material, to the shaded state, with the according optimized switching algorithm.

The results of the simulations of the first step, employing the TRNSYS integrated shading mechanism, omitting scheduled internal loads and

gains, are shown below, with regard to the monthly and overall yearly energy demand for heating and cooling, for the year specific and month specific optimization in Figure 5 and Figure 6 respectively.

Figure 5 and Figure 6 becomes obvious by the variation in the course of these lines. In the case of the year specific optimization in Figure 5, the horizontal lines represent fixed optimized values along the whole

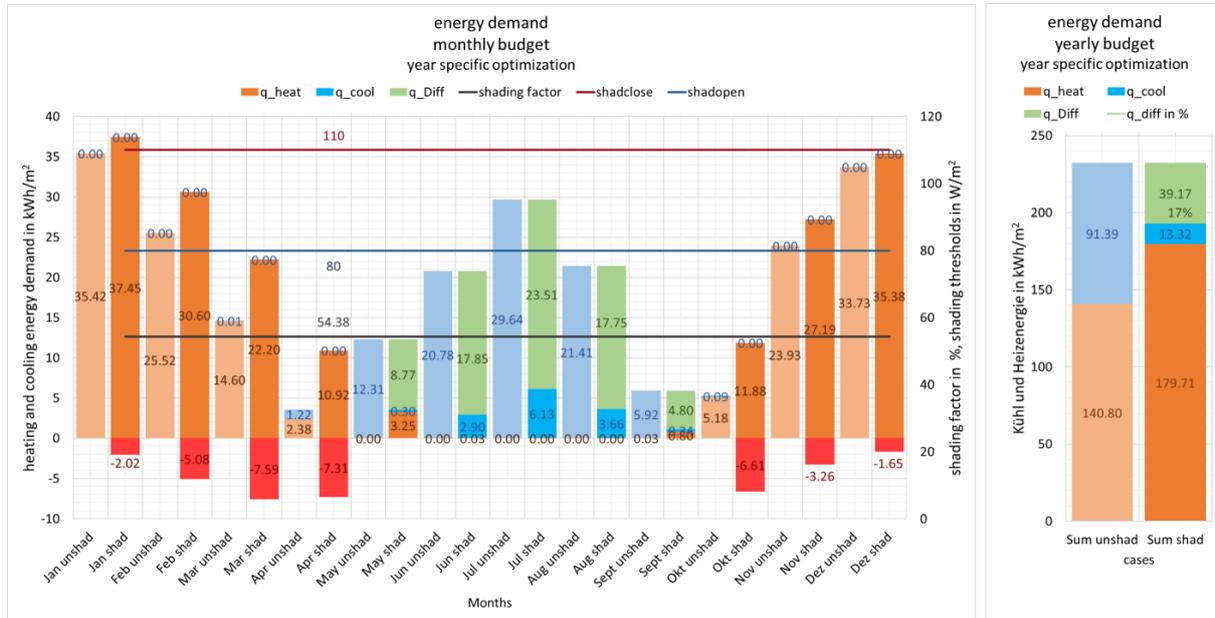


Figure 5: Energy demand for year specific optimization with TRNSYS integrated shading.

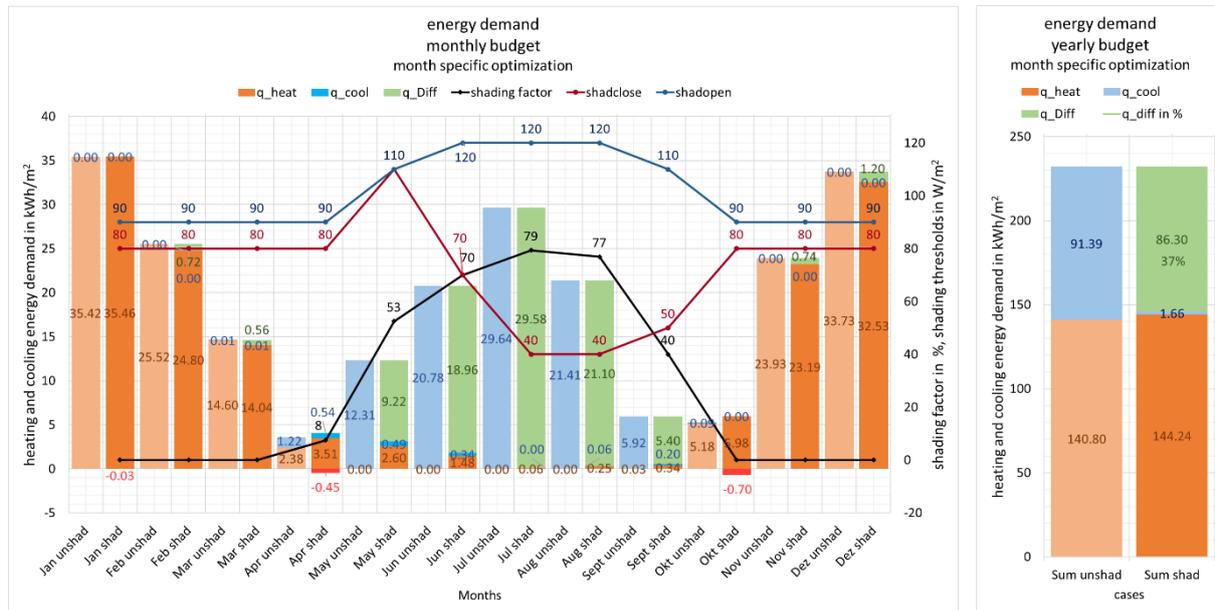


Figure 6: Energy demand for month specific optimization with TRNSYS integrated shading.

The heating and cooling energy demands are displayed as orange and blue colored columns and reductions and increases in energy demand are marked as green and red colored columns respectively.

The thresholds for the switching algorithm of the shading, as well as the maximum shading factor, are illustrated as values for each month connected by straight lines. The difference in the switching algorithm, i.e. year specific and month specific, in

year, found by the optimization routine for the corresponding minimum in overall yearly energy demand, whereas in Figure the parameters are individually adjusted each month in the month specific optimization to achieve the lowest possible energy demand in each month.

In both cases of the optimizations, the dynamic shading results in a reasonable amount of reduction in the overall energy demand of the building of about 17% in the year specific and 37% in the month specific optimization, indicated by the green column shown on the right side part of the plots.

This reduction emerges completely from the decrease in heat load from external radiative energy influx and the corresponding decrease in cooling energy demand. It can also be seen that a fixed year specific threshold for the switching leads to an increase in heating energy demand during the winter time, when the outer temperature is typically below the comfortable room temperature, due to the reduction of radiative heat transfer into the building. The required shading factor for the achieved energy reduction is about 59 % in the year specific case and peaks at a maximum of about 79 % in the month specific case. This seems to be in the viable range of the real commercial elements, according to the solar transmission rate of about 7 % and about 20 % for the darkest stage of the ECONTROL and EELICON elements respectively from Table 2. In contrast to the internal shading system in TRNSYS, where the unshaded stage is simply the transparent window pane material, real electrochromic elements display a reduced solar transmission rate of about 49 % (ECONTROL) and 34 % (EELICON), which does reduce the transmitted radiative energy flux into the building even in their brightest “unshaded” state. The results of the simulation employing data from the real electrochromic elements are shown below. For the sake of brevity we will only show the results of the month specific optimization in a month resolved plot. A comparative overview of the different switching scenarios including the year specific optimization will be given further below. The results of the month specific optimization for the ECONTROL and EELICON elements are shown in Figure 7 and Figure 8 respectively.

the electrochromic switching process is also displayed as yellow and gray colored columns respectively. Additionally, to the thresholds for the electrochromic states the number of switching processes is also displayed in the plots. For both electrochromic elements a reasonable reduction in the overall energy demand of about 8 % for ECONTROL and about 22 % for EELICON elements is found. Again the reduction emerges mostly from a decrease in the cooling energy demand due to the reduced radiative heat transfer. The energy demands for artificial lighting and the switching of the electrochromic system are significantly lower than the energy demand for heating and cooling, by about one to four orders of magnitude. The aforementioned impact of the reduced transparency of electrochromic elements in general can be seen in an increase of the energy demand for heating in winter months, when no switching occurs and the electrochromic elements stay constantly in the brightest state. This is simply due to the reduced transmission rate for solar radiation of the electrochromic elements in the brightest unshaded state, in comparison to the unshaded transparent window material. This effect is overcompensated in the overall yearly energy demand. The general impact of variations in the switching strategies was demonstrated by the comparison of the results of the year specific and month specific optimization. In general one would assume that the reduction in energy demand would correlate to the resolution of the timescale of the optimization. An adaptation of the switching routine to individual, daily or even hourly environment changes might therefore result in a further reduction of the energy demand.

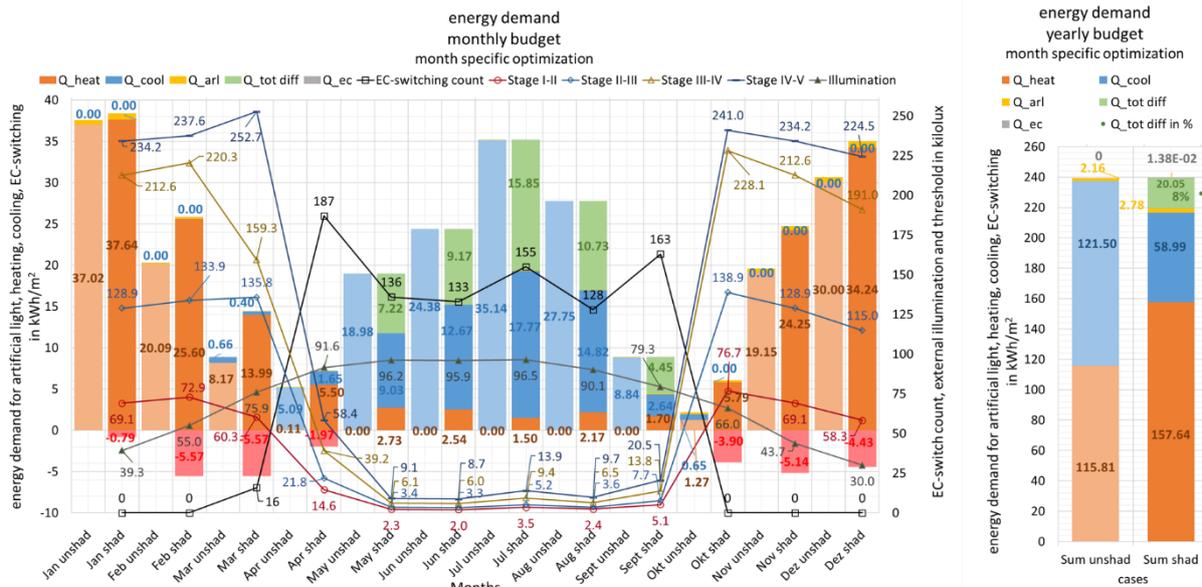


Figure 7: Energy demand for month specific optimization with ECONTROL elements.

In addition to the energy demand for heating and cooling the energy demand for artificial lighting and

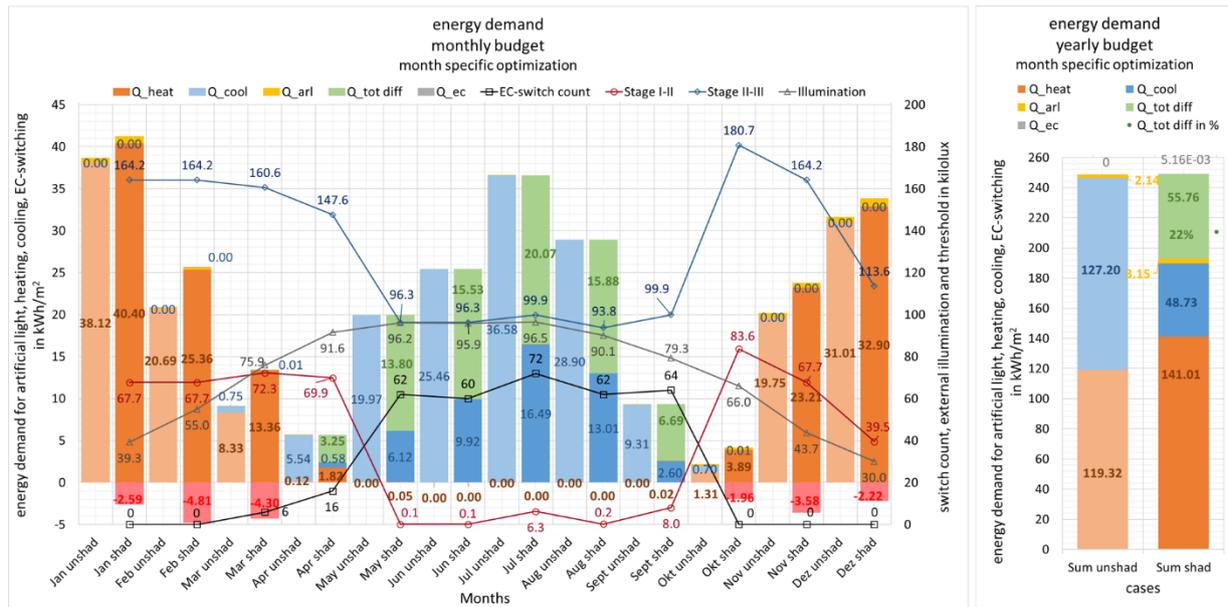


Figure 8: Energy demand for month specific optimization with EELICON elements.

In order to depict the correlation between switching strategy and energy reduction, a more comprehensive comparison of the impact of the different switching algorithms on the overall yearly energy demand is displayed below, exemplarily for the EELICON elements in Figure 9.

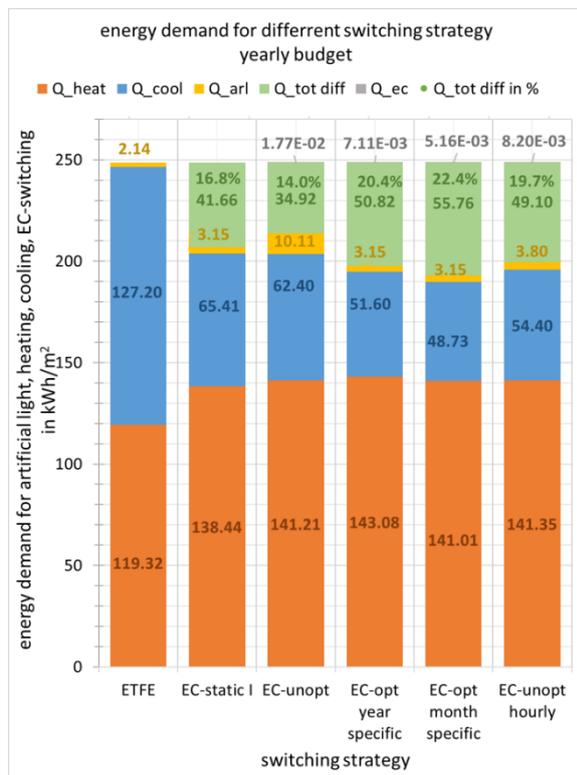


Figure 9: Energy demand for different switching algorithms with the EELICON elements.

The installation of the electrochromic elements without any switching (EC-static I) results in a reduction of the overall yearly energy demand of the building of 16.8 %. The unoptimized year specific switching strategy (EC-unopt) by identifying the thresholds simply by means of preprocessing of the numerical simulation for each shading state results in a reduction of about 14 %, whereas a switching strategy by the year specific optimization (EC-opt year specific) leads to a reduction of 20.4 %. The switching strategy by the month specific optimization (EC-opt month specific) results in a reduction of 22.4 %. At last an attempt of an hourly switching strategy was conducted (EC-unopt hourly), again by means of preprocessing of the data of the numerical simulation of each shading state and manually assigning a state to every hour. This resulted in a reduction of 19.7 %. Generally a trend can be identified for a higher reduction in relation to the time resolution of the optimization. The highest potential for a reduction in energy demand is achieved with the month specific optimization.

SUMMARY AND OUTLOOK

In conclusion of the numerical investigations within this endeavor it can be stated, that dynamic shading with electrochromic elements bears reasonable potential for the reduction of the overall yearly energy demand. The adaptation of the thresholds for the switching algorithm based on month specific optimization bears prospect of higher reduction in the energy demand in comparison to adaptation based on year specific optimization. Employing a switching strategy, based on assignment of the thresholds by simple preprocessing of numerical results is slightly inferior to the optimizational approach. The overall energy demand for the electrochromic elements is typically several orders of magnitude smaller than other energy demands of the building and is therefore mostly negligible.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the project partners for their valuable collaboration and for providing spectroscopic data of the electrochromic elements.

The project “FLEX-G” (funding reference 03ET1470A) is funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi).

REFERENCES

- Antretter, F., 2008. Thermal Transfer through Membrane Cushions Analyzed by Computational Fluid Dynamics, FHG-IPB, Holzkirchen.
- ASTM G173-03(2012), Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org.
- Cremers, J., Marx, H., 2017. Improved Daylight Comfort by a New 3D-Foil That Allows to Trade off Solar Gains and Light Individually. Structural Membranes 2017. Munich. Proceedings, p.133-140.
- Cremers, J., Marx, H., 2017. 3D-ETFE: Development and evaluation of a new printed and spatially transformed foil improving shading, light quality, thermal comfort and energy demand for membrane cushion structures. Energy Procedia, Vol. 122, p. 115–120.
- Flor Jan-Frederik, Dingming Liu, Yanyi Sun, Paolo Beccarelli, John Chilton, Yupeng Wu, 2018. Optical aspects and energy performance of switchable ethylene-tetrafluoroethylene (ETFE) foil cushions, Applied Energy, Volume 229, Pages 335-351, ISSN 0306-2619.
- Hanam, B. et al., 2014. Energy Performance of Windows: Navigating North American and European Window Standards”, 14th Canadian Conference on Building Science and Technology-Toronto, Ontario, Canada
- Jianhui Hu, Wujun Chen, Zhenyu Qiu, Bing Zhao, Jinyu Zhou, Yegao Qu, 2015. Thermal performances of ETFE cushion roof integrated amorphous silicon photovoltaic, Energy Conversion and Management, Volume 106, Pages 1201-1211, ISSN 0196-8904.
- Kaufmann, A., Mitterer, C. 2007. Membrane im Bau - bauphysikalische Optimierung und neue Einsatzbereiche Kurztitel: OptiMA, Fraunhofer IBP Selbstverlag.
- Knippers, J., Cremers, J., Gabler, M., & Lienhard, J. 2013. Atlas Kunststoffe + Membranen: Werkstoffe und Halbzeuge, Formfindung und Konstruktion. München: Detail.
- Liebhart, H., Cremers, J., Hajek, O., Marx, H., Mirbach, D. 2019. The ideal ETFE fenestration: The influence of material properties on the thermal performance, Proceedings of the IASS Annual Symposium 2019 – Structural Membranes 2019, Form and Force 7 – 10 October 2019, Barcelona, Spain.
- Manara, J. et. al, 2012. MESG: Membran-konstruktionen zur energetischen Sanierung von Gebäuden, Abschlussbericht, Würzburg 2012
- Marx, H., 2018. FMESG: 'Functionalised membrane structures for energy-efficient retrofitting of buildings', Partial project: Building physics and architectural concepts, Final report, Stuttgart.
- Vos, J. J. (1978). Colorimetric and photometric properties of a 2-deg fundamental observer. *Color Research and Application*, 3, pages: 125-128, 197

SIMULATION-ASSISTED DAYLIGHT PERFORMANCE EVALUATION OF AN EDUCATIONAL BUILDING IN A MEDITERRANEAN CLIMATE

S. Dervishi¹ and F. Jemini¹

¹Department of Architecture, Epoka University, Tirana, Albania

ABSTRACT

Utilization of natural light has been recognized to be valuable in achieving buildings with energy efficiency and in enhancing visual quality of interior spaces. This research evaluates the daylight performance of three-selected zone in an educational building in Tirana, Albania. The study explores the building geometry, orientation, glazing transmittance and window to wall ratio parameters on indoor daylight distribution. Radiance daylight software is used to simulate the horizontal illuminance (E) and high dynamic range luminance images (L) Simulation model incorporates detailed information of the building geometry, materials and transparency, to generate a finite-element simulation model.

INTRODUCTION

Daylight has always played a dominant role in human life, as an efficient, natural, renewable source of energy. It has a great impact in students' performance, creation of enjoyable settings, promotion of healthier environments (Boyce et al. 2013). The use of natural light in schools can ensure both physiological and physical benefits to pupils, teachers, administrators and working staff. Different studies have proven the high significance daylight has on human productivity, health and wellbeing (Houck 2015, Hescong et al. 2002, Dumont & Beaulieu 2007, Küller et al. 2006) Moreover, in educational environments, good daylight has a great impact on learning outcomes of the students, as well as in the attendance rates (Haverinen-Shaughnessy et al. 2015). In addition, good daylighting in schools helps in providing good vision for performing any task comfortably and easily for both students and teachers. Evidentially, it is impossible for students to study with inadequate lighting (Boyce 2010). The distribution of sufficient and adequate light in the workplace desk and blackboard, affects not only the visual comfort but also the concentration of students (Dudek 2007).

As such, this research aims to examine the daylight performance of a faculty building, Epoka University in Tirana, Albania. The study analyses the daylight performance in selected classes and office space and evaluates the daylight parameters which would provide adequate visual comfort. Annual illuminance

levels, daylight factor, daylight autonomy are explored via Radiance computational simulation model. In addition, survey data gathering is used to explore occupant's daylight comfort of indoor spaces.

METHODOLOGY

This study evaluates the daylight performance of selected classrooms and identifies the typologies and parameters which provide adequate daylight illuminance. The study is conducted based on the data collection from the class layouts, the window size and transparency information. Daylight computational simulation analysis is used to predict illumination, visual quality and evaluate daylighting performance. The investigated time is between 09:00hrs am to 17:00hrs pm, during four discrete days of the year: 20th March, 21st of June, 22nd of September and 21st of December. Perez sky model (Perez et al. 2003) is used to generate the sky illuminance model. For the purpose of this study, RADIANCE simulation software (Ward 1994) is used to perform simulations for daylight illuminance levels in the classrooms.

Case Study Description

Three zones located at Architecture and Engineering faculty building at Epoka University in Tirana, Albania, are selected in order to evaluate the daylight performance. The selection criteria of classrooms is based on geometry, materials, window typology, WWR and orientation. The zones are positioned in North-West South and North-East orientations. The window to wall ratio (WWR) varies from 30% to 70%. Spaces are evaluated under various skies (e.g. overcast, clear). Each test spaces have a reconfigurable window wall facing due north-east, north-west and south orientation respectively. Figure 1 shows the floor plan of the interior organization of the spaces in the building. The selected classrooms are located on the 1st floor. The glazing of the selected zones is double pane low E glazing (with normal luminous reflectance of 0.1 and 72% light transmittance). A luminance Meter LS-150 was used to measure the surface brightness (see table 1)

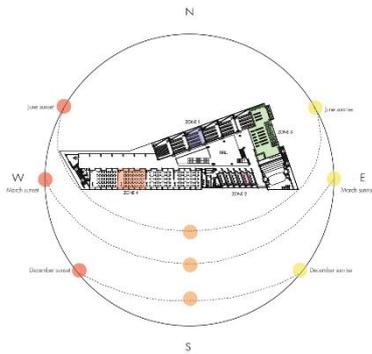


Figure 1: Floor plan of the building that identifies the spaces used for analysis.

– Zone 1 (Classroom)

The zone 1 (Classroom) faces North-West direction. The windows are placed in the centre of the wall, in order to maintain a view to outside. The window to wall ratio (WWR) is 40%. Figure 2 illustrates the geometry (plan, section, 3D view) including the grid workstation points used for daylight evaluation.

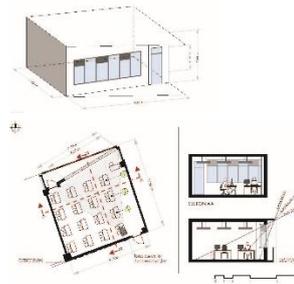


Figure 2: Geometric properties in plan, section and 3D view of Zone 1 (Classroom).

– Zone 2 (Library)

The Zone 2 (Library) library facing North-East direction, dimensions and location of view, have been described with real existing conditions in the following drawings. The Window to Wall Ratio (WWR) is 70%. Figure 3 illustrates the geometry (plan, section, 3D view) including the grid points used for daylight evaluation.

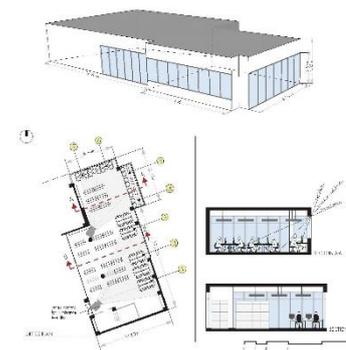


Figure 3: Geometric properties in plan, section and 3D view of Zone 2 (Library).

– Zone 3 (Architectural Studio)

The large classroom (Architectural studio) faces South direction with a Window to Wall Ratio (WWR) of 90%. The transparency has been considered to maintain a view to outside. Figure 4 illustrates the geometry (plan, section, 3D view) including the grid points used for the daylight evaluation.

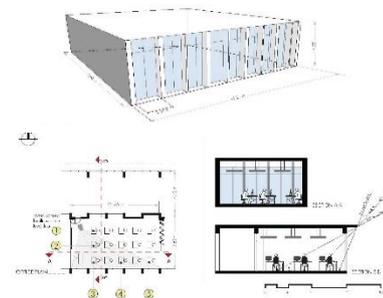


Figure 4: Geometric properties in plan, section and 3D view of Zone 3 (Architectural Studio).

Table 1: Configuration of selected spaces

	ZONE 1	ZONE 2	ZONE 3
Geometry	9.00 x 10.0 x 4.35 m	15.35 x 11.0 x 4.35	15.35 x 11.0 x 4.35 m;
Orientaiton	north west	south	north east
Reflectance	Ceiling 0.80, wall 0.7 floor 0.4	Ceiling 0.80, wall 0.75 floor 0.4	Ceiling 0.80, wall 0.75 floor 0.4
Window Size	6.60 x 2.10 m sill height 1.00 m	5.35 m x 4.00 m sill height at floor level	5.35 x 4.00 m sill height at floor level
Glazing property	Double Glazing, T _{vis} = 0.70	Double Glazing, T _{vis} = 0.70	Double Glazing, T _{vis} = 0.70

Simulation

RADIANCE Simulation software is used to predict workstation horizontal illuminance (E) at various locations in space and high dynamic range luminance images (L). Simulation model incorporates detailed information of the building geometry, materials and transparency to generate a finite-element simulation model (see table 1). Perez et al. (1993) sky radiance model which uses clearness index as a classification criteria of the skies is used for to generate sky luminance maps. Studies have indicated that Perez all weather sky model has shown high accuracy (Dervishi and Mahdavi 2012, Orehousing et al. 2014, Dervishi and Mahdavi 2013). The hourly simulations are run over the same height (75 cm above the floor plane) and are performed during the autumnal and vernal

equinoxes (21st September & 21st March) and summer and winter solstices (21st June & 21st December) from 9:00 am to 17:00 hours, local time. Each of the 48 resulting sky conditions are generated by the GENDAYLIT Radiance program utilized by the PEREZ all weather sky. The diffuse fraction of solar irradiance is derived by Perez Model (Dervishi and Mahdavi 2013).

The point locations of the workstation to compute the horizontal illuminance (E) are illustrated as per Figures 3 to 5 for each space. Furthermore, detailed high dynamic range luminance images were generated for the four discrete days of the year: The radiance input parameters are detailed in Table 2.

Table 2:
Radiance simulation input parameters

SIMULATION PARAMETER	VALUE
Ambient bounces (ab)	4
Ambient divisions (ad)	1024
Ambient sampling (as)	20
Ambient accuracy (aa)	0.22
Ambient resolution (ar)	512

RESULTS AND DISCUSSION

– Zone 1 (classroom)

Figures 6 and 7 illustrate the computed horizontal illuminance levels of Zone 1 (classroom) for four reference days. Whereas, figure 8 and 9 illustrate the RADIANCE illuminance images (E, lx) and high dynamic range luminance images (L, cd/m²) respectively.

As the figures illustrate, the daylight levels are rather low (mainly diffuse light) for the reference days in September, December and March resulting in low comfort and productivity. During these reference days, windows provided higher daylight levels during the period 10:00 am to 13:00 pm with illuminance level ranging between 416 to 537 lux. As the classroom is oriented towards the North West direction, during summer solstice month (21st of June), illuminance level are exposed to direct daylight only after 15:00 with illuminance level between 904 – 1247 lux (see figure 12). Figure 13 shows a set of false colour luminance images depicting the distribution and intensity of redirected sunlight between 09:00 am to 17:00 pm for the reference days. During summer solstice, luminance levels of the zones near the window are significantly greater. Average ceiling zone luminance peaked at about 3000 cd/m² during summer solstice. Peak levels are lower during equinox and Winter solstice periods, 750.25 cd/m²-1900 cd/m², respectively.

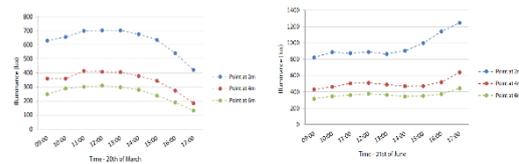


Figure 5: Workplace Illuminance levels of selected virtual sensors of Zone 1 for 20th of March (left) and 21st of June (right)

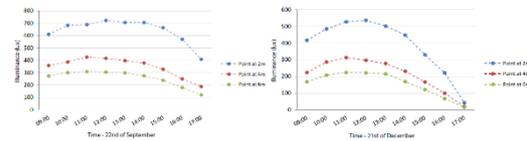


Figure 6: Workplace Illuminance levels of selected virtual sensors of Zone 1 for 22nd of September (left) and 21st of December (right)

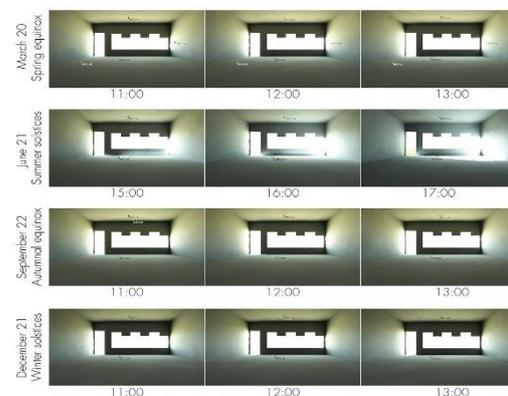


Figure 7: Rendering in Radiance Simulation calculations showing luminance levels (candela/m²) at 2.0 m distance from window of Zone 1 for four reference days (20th of March, 21st of June, 22nd of September, 21st of December)

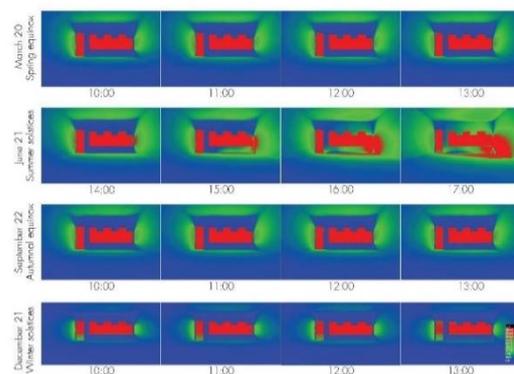


Figure 8: Falsecolor luminance images (cd/m²) of Zone 1 for four reference days (20th of March, 21st of June, 22nd of September, 21st of December)

– Zone 2 (*library*)

Figures 9 and 10 show the computed horizontal illuminance levels of Zone 2 (*library*) facing North-East orientation for four reference days. Whereas, figure 11 and 12 illustrate the RADIANCE illuminance images (E) and high dynamic range luminance images (L) respectively.

As figures show, workplaces near the windows are highly exposed to daylighting in summer solstice (on 21st of June) which tend to be not comfortable. The illuminance levels range from 1206 to 19570 lux. However, during the spring and autumnal equinox (20th of March and 21st of September) and winter solstice (21st of December) the zone is highly exposed to direct light from 09:00 am to 10:00 am, while during the other hours the daylight levels are considerably reduced. Average ceiling zone luminance peaked more than 3000 cd/m² during the summer solstice. As expected, peak levels are lower during autumnal, spring equinox and winter solstice periods, ranging from 755.6 cd/m²-3000 cd/m².

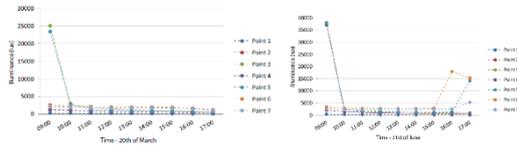


Figure 9: Workplace Illuminance levels of selected virtual sensors of Zone 2 for 20th of March (left) and 21st of June (right)

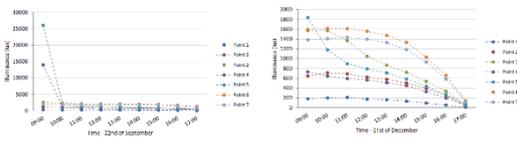


Figure 10: Workplace Illuminance levels of selected virtual sensors of Zone 2 for 22nd of September (left) and 21st of December (right)

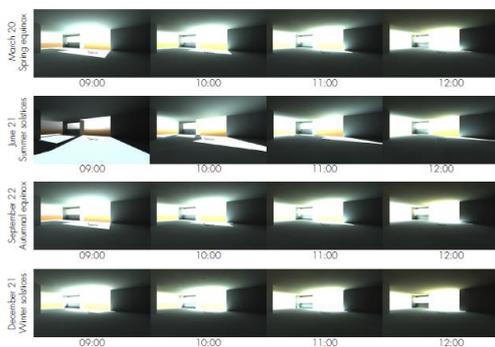


Figure 11: Rendering in Radiance Simulation calculations showing luminance levels (candela/m²) at 2.0 m distance from window of Zone 2 for four reference days (20th of March, 21st of June, 22nd of September, 21st of December)

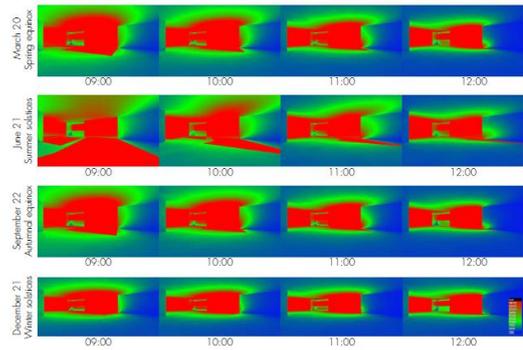


Figure 12: Falsecolor luminance images (cd/m²) of Zone 2 for four reference days (20th of March, 21st of June, 22nd of September, 21st of December)

– Zone 3 (*architectural studio*)

Figures 13 and 14 illustrate the computed horizontal illuminance levels of Zone 3 (*architectural studio*) facing South orientation for the four reference days. Whereas, figure 15 and 16 illustrate the RADIANCE illuminance images (E) and high dynamic range luminance images (L) respectively.

Simulated horizontal illuminance levels during four discrete days of the year are considerably high from morning 09:00 am until noon 16:00 pm. In summer solstice day (21st of June) close to the windows, with illuminance between 2750 to 3718.7 lx. For the other reference days, illuminance values range from 2660-39750 lux, exposed to the zone's deep surface. Average ceiling zone luminance peaked more than 3000 cd/m² during the Summer solstice day. Peak levels resulted lower during the other reference days ranging from 2020 cd/m² more than 2850 cd/m².

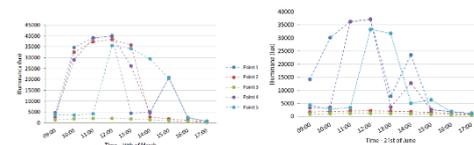


Figure 13: Workplace Illuminance levels of selected virtual sensors of Zone 3 for 20th of March (left) and 21st of June (right)

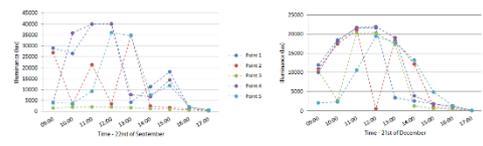


Figure 14: Workplace Illuminance levels of selected virtual sensors of Zone 3 for 22nd of September (left) and 21st of December (right)

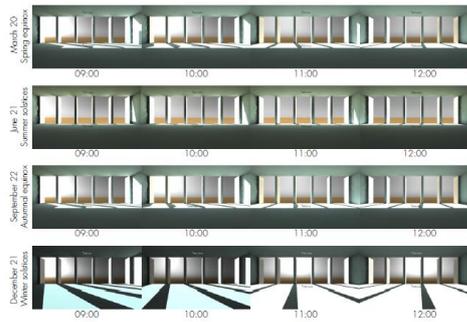


Figure 15: Rendering in Radiance Simulation calculations showing luminance levels (candela/m²) at 2.0 m distance from window of Zone 3 for four reference days (20th of March, 21st of June, 22nd of September, 21st of December)

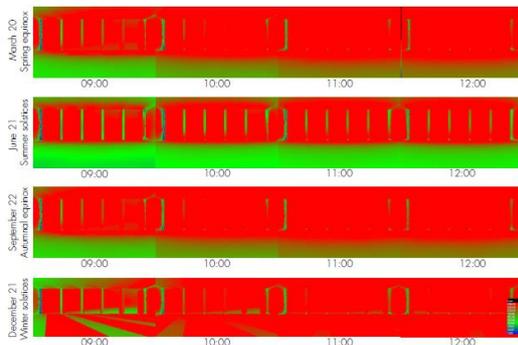


Figure 16: Falsecolor luminance images (cd/m²) of Zone 3 for four reference days (20th of March, 21st of June, 22nd of September, 21st of December)

OPTIMIZATION

Daylight availability was analyzed for the three zones facing North-West, North-East and South orientation respectively. Overlit areas reached more than 70% in Zone 3 (South orientation), followed by 53% in Zone 2 (North-East orientation) and 42% in Zone 1 (North-West orientation). However, no partially daylight areas were anticipated in South oriented zone space, effected by window size (WWR 90%) and glazing properties (see table 1). The layout design of zones 3 (*Architectural Studio*) shows that the working environment lacks daylight comfort. As such, a slat angles exterior horizontal shading system with aluminium reflective material is proposed. The proposed design of exterior shading device is modelled at a distance to the outer glass layer. The proposed design of exterior shading aims at minimizing glare and reducing the daylight levels in indoor areas during clear skies in hot seasons. Figure 17 and 18 illustrate the geometry of the exterior shading and the application in the façade system of

Zone 3. Table 3 illustrates the variations of slat angle shading design.

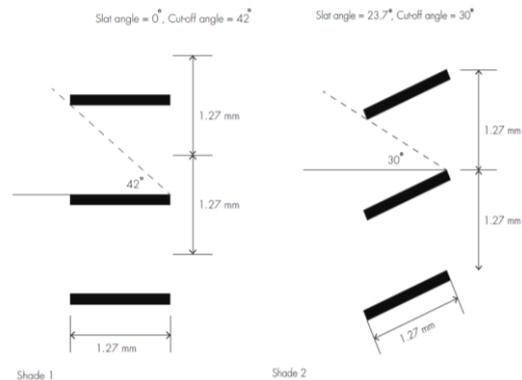


Figure 17: Geometry of the proposed exterior slat shades

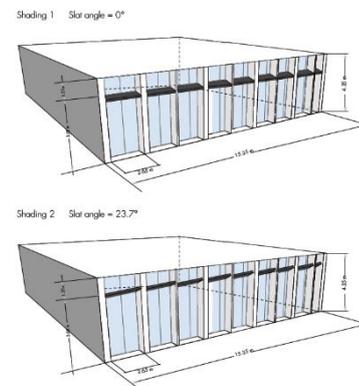


Figure 18: Facade elevation with the slat angle 0° and 23.7° shading design proposal of Zone 3 (South direction).

Table 3: Variations of slat angle shading design.

Shading system	Shading 01	Shading 02
Slat angle (degree)	0	30
Cut-off angle (degree)	45	30
Ratio: slat width to spacing	1:1	1:1

Figures 19 and 20 illustrate the computed horizontal illuminance levels of Zone 3 (*architectural studio*) with the use of shading systems with slat angle 0° and 23.7° respectively. As figures illustrate, the use of shading devices reduces considerably the daylight levels in summer solstice (21st of June) of workspaces. The slat shading angle of 0° results to perform better than slat shading angle of 23.7°, reducing considerably the horizontal illuminance to required level. Furthermore, luminance peak levels (Summer solstice

day) are reduced with a range of 1730 cd/m² to 2002 cd/m² (see figure 21 and 22).

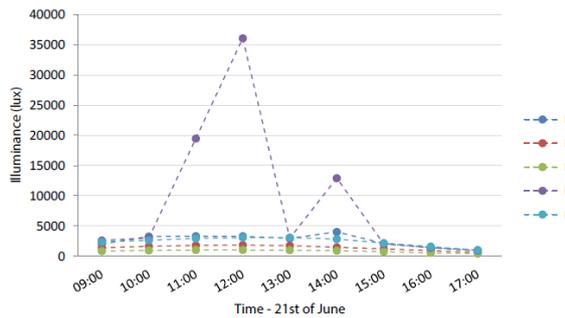


Figure 19: Workplace illuminance level for June solstice month (21st of June) with exterior slat shading angle = 0 °

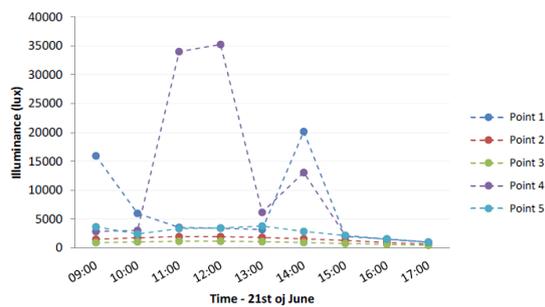


Figure 20: Workplace illuminance level for June solstice month (21st of June) with exterior slat shading angle 23.7 °.

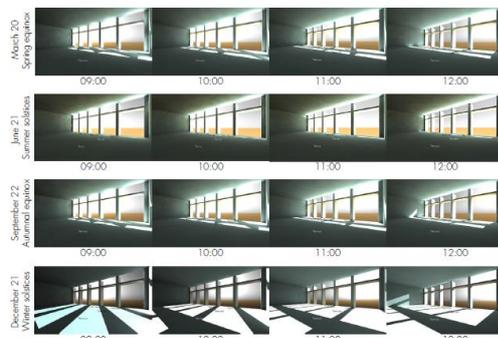


Figure 21: Rendering in Radiance Simulation calculations showing luminance levels (candela/m²) at 2.0 m distance from window of the optimized scenario (slat shading angle of 0 °) for four reference days (20th of March, 21st of June, 22nd of September, 21st of December)

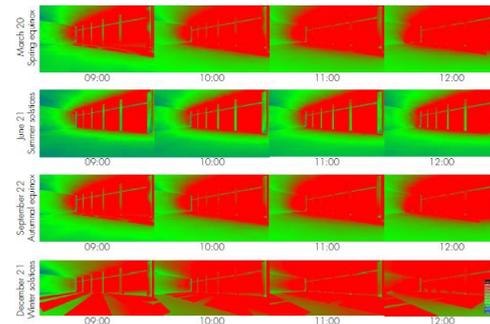


Figure 22: False color luminance images (cd/m²) of the optimized scenario (slat shading angle of 0 °) for four reference days (20th of March, 21st of June, 22nd of September, 21st of December)

CONCLUSION

Natural light is a crucial component for the quality of indoor environment. The behavior of occupants working in spaces and their organizational outcomes in terms of comfort, productivity, health and well-being are highly influenced by the quality of light in indoor environment. Daylight utilization in educational buildings can be improved while enhancing the natural indoor working quality and saving lighting consumption. Many significant factors influence the daylight performance including orientation, geometry, materials, window to wall ratio (WWR, %), glazing properties and the appliance of shading systems.

This research investigates the daylight performance of three zones located at Epoka University in Tirana, Albania. The horizontal illuminance levels and high dynamic range luminance images are explored via computational simulation. The selection criteria of classrooms is based on the geometry, materials, window typology, WWR and orientation. Spaces are evaluated under different sky (e.g. overcast, clear sky) conditions. The study showed that, Zone 3 performs the worst with considerably high illuminance levels. A shading control design was implemented to the facade in order control and potentially reduce the strong daylight during the Summer solstice months. The two proposed slat shading angle 0° and 23.7° were tested in zone (Architectural Studio) facing south direction. The results showed that the slat shadings angle 0° performed better to the reduction of illuminance level (lux) of a daylit space during the strongest daylight in summer solstice (21st June). The simulations carried out in this research show that the performance of a building could be controlled and examined since the very first stage of design. This investigation therefore intends to increase awareness on the elemental role daylight has as the main feature of quality learning spaces. Additionally, the study emphasizes the aspects of design, that are substantially indispensable for good daylighting in educational buildings.

REFERENCES

- Baker N. V., Fanchiotti, A., & Steemers, K. 1993. *Daylighting in Architecture: A European Reference Book*.
- Boyce, Peter. 2013. *Lighting Quality for All*. CISBE & SLL International Lighting Conference - Dublin 2013. Session 3. ISSN 03606325
- Boyce, Peter R. 2010. Review: The impact of light in buildings on human health. *Indoor and Built Environment*. DOI: 10.1177/1420326X09358028
- Dervishi S, Mahdavi A. Computing diffuse fraction of global horizontal solar radiation: A model comparison, *Solar Energy*, 86 (2012), 6; 1796 - 1802.
- Dervishi S., Mahdavi A. A simple model for the derivation of illuminance values from global radiation data, *Building Simulation*, 6 (2013), 4; 379 - 383.
- Dervishi, Mahdavi. 2013: "A model to estimate luminous efficacy of global solar radiation for all sky conditions". CLIMA 2013. 11th Rehva World Congress & 8th International conference on IAQVEC. 16-19. 06. 2013. Prague, Czech Republic.
- Boyce, P. 2003. *Human Factors in Lighting*, 2nd edition. New York, USA: CRS PRESS.
- Boyce, P., Hunter, C., & Howlett, O. 2003. *The benefits of daylight through windows*. New York: Report, Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute.
- Dudek, M. 2007. *A Design Manual: Schools and Kindergartens*. Birkhauser, 250.
- Dumont, M., & Beaulieu, C. 2007. Light exposure in the natural environment: Relevance to mood and sleep disorders. *Sleep Medicine*, 557-565.
- Haverinen-Shaughnessy, U., Shaughnessy, R., Cole, E., Toyinbo, O., & Moschandreas, D. 2015. An assessment of indoor environmental quality in schools and its association with health and performance. *Built Environment*, 35-40.
- Heschong, L., Wright, R. L., & Okura, S. 2002. Daylight impact on Human Performance in School. *Journal of the Illuminating Engineering Society*.
- Houck, L. 2015. A novel approach on assessing Daylight access in Schools. 8th Nordic Conference on Construction Economics and Organization (pp. 40-47). Tampere, Finland: Elsevier.
- Küller, R., Ballal, S., Laike, T., Mikellides, B., & Tonello, G. 2006. The impact of light and colour on psychological mood: a cross-cultural study of indoor work environments. *Ergonomics in Design*, 1496-1507.
- Orehounig K., Dervishi S., Mahdavi A.: Computational derivation of irradiance on building surfaces: An empirically-based model comparison, *Renewable Energy*, 71; 185– 192
- Perez R, Seals R, Michalsky J. 1993. All weather model for sky luminance distribution—preliminary configuration and validation. *Solar Energy*, Vol: 50 (3), pp: 235–245.
- Ward, G. J. 1994. The RADIANCE lighting simulation and rendering system. In SIGGRAPH '94: Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pages 459–472. ACM Press.

X: Modellierung und Simulation auf Stadt- und Quartierebene

DREIDIMENSIONALE ERMITTLUNG DES THERMISCHEN KOMFORTS MIT DETAILLIERTER BERECHNUNG DER STRALUNGSTEMPERATUREN AUF BASIS VON MESSDATEN AUS DROHNENBEFLIEGUNGEN

D. Rüdisser¹, T. Weiss¹ und L. Unger²

¹AEE INTEC, Gleisdorf, Österreich

²Skyability GmbH, Siegendorf, Österreich

KURZFASSUNG

Eine neue Methode und Prozesskette zur Evaluierung des thermischen Komforts, bzw. der Wärmebelastung in urbanem Gebiet wird formuliert und anhand einer Fallstudie in einem städtischen Quartier erprobt. Die Methode berücksichtigt insbesondere die Signifikanz aller relevanten Strahlungseinflüsse in Bezug auf das Hitzeempfinden. Zur möglichst exakten Bestimmung derselben werden anhand von Drohnenbefliegungen radiometrische Messungen vorgenommen. Die ermittelten Daten werden in ein detailliertes 3D-Stadtmodell übertragen und auf Basis eines Monte-Carlo Samplingalgorithmus unter Berücksichtigung der humanen Topologie ausgewertet. Die so errechneten lokalen mittleren Strahlungstemperaturen werden für die Erstellung von hochaufgelösten thermischen Komfortkarten und zur Identifizierung und Beurteilung lokaler Hotspots und relevanter Einflussgrößen herangezogen.

EINLEITUNG

Das Thema des thermischen Komforts, sowohl im Innenraum als auch im Außenbereich, gewinnt rasant an Bedeutung. Die Relevanz wird mit dem subjektiven Terminus „Komfort“ vielfach jedoch nur unzulänglich beschrieben, da die Hitze- oder Kältebelastung, welche mit sehr hohen oder sehr niederen Werten der thermischen Komfortindizes verbunden ist, zu objektivem physiologischem Stress führt. Dieser stellt nicht nur eine Behaglichkeitsbeeinträchtigung dar, sondern kann gravierende gesundheitsrelevante Auswirkungen bis hin zu einem Anstieg der Mortalitätsraten haben. Eine Metastudie der WHO Europe (WHO, 2004) untersuchte die Auswirkungen und Einflussfaktoren von Hitzewellen und empfiehlt eine gezielte Berücksichtigung der mikroklimatischen Auswirkungen bei der Stadtplanung zur Reduktion der Hitzebelastung in Städten.

Für zielgerichtete Optimierungsmaßnahmen, welche sich auf die Reduktion der Hotspots in Form von Intra-Urban-Heat-Islands (IUHI) konzentrieren, ist es notwendig die komplexen Zusammenhänge zu verstehen und die wesentlichen Einflussfaktoren zu identifizieren. Zunehmend wird für diese Aufgabe eine Reihe von Simulationstools eingesetzt. Meist aufbauend auf einen zukunftsweisenden Ansatz, welcher bereits in den 1970er von Fanger (FANGER PO et al., 1970) formuliert wurde, wird mit Hilfe von

numerischen Berechnungen versucht, die für die Auswertung essentielle mittlere Strahlungstemperatur T_{MRT} mit unterschiedlich detaillierten Ansätzen zu bestimmen. Zu nennen sind hier etwa die Verfahren bzw. Tools CityComfort+ (Huang et al., 2014), EnviMet (Toudert, 2005), RayMan (Matzarakis et al., 2010), SOLWEIG (Lindberg et al., 2008) oder Rakha (Rakha et al., 2017).

Für eine umfassende, exakte Simulation urbaner Oberflächentemperaturen wäre es nötig sehr detaillierte und verknüpfte Gleichungssysteme zu lösen. Zudem gilt es eine Vielzahl an Randbedingungen und Materialparameter möglichst exakt festzulegen. Ausgehend von den Randbedingungen Sonneneinstrahlung, Höhenwind, Niederschlag, Bewölkung, Luftfeuchte und allfälligen Wärmequellen entfaltet sich ein sehr komplexer Wärmeaustausch. Für eine adäquate Simulation gilt es die Mechanismen Wärmestrahlung, Konvektion, Wärmeleitung und Wärmespeicherfähigkeit in ausreichender räumlicher und zeitlicher Auflösung über einen ausreichend großen Bereich zu simulieren. Es ist daher schwierig mit oben genannten Verfahren belastbare Absolutwerte exakt vorherzusagen. Die Simulationsverfahren eignen sich jedoch gut zur Analyse von Sensitivitäten und Wechselwirkungen.

Das hier vorgeschlagene Verfahren stellt gewissermaßen eine Hybridvariante dar. Grundsätzlich handelt es sich um eine messtechnische Untersuchungsmethode für die Auswertung der Messdaten. Insbesondere für die Ableitung des gesuchten des thermischen Komforts werden jedoch numerische Verfahren eingesetzt, welche in ähnlicher Weise in oben genannten Simulationsprogrammen zur Anwendung gelangen.

Der Entwicklung des Verfahrens wurde die Arbeitshypothese unterlegt, dass die zentrale Einflussgröße bei der Bestimmung des thermischen Komforts in sommerlichen urbanen Umgebungen die mittlere Strahlungstemperatur ist, da die Strahlung in der Wärmebilanz einerseits den größten Wärmestrom darstellt und andererseits den größten räumlichen Variationen unterliegt. Die möglichst exakte Bestimmung dieser Größe stellte deshalb die zentrale Aufgabestellung bei der Entwicklung des Verfahrens dar. Sowohl auf der Empfängerseite (Mensch) als auch auf der Senderseite (Umgebung) wurde eine möglichst verfeinerte Beschreibung angestrebt. Hierfür wurden einerseits richtungsabhängige

Suszeptibilitätsfunktionen auf Basis der menschlichen Topologie bestimmt, andererseits wird das Einstrahlungsfeld, bestehend aus der thermischen Strahlung aller Oberflächen, der atmosphärischen Gegenstrahlung, sowie direkten und diffus reflektierten und gestreuten Sonneinstrahlung, auf Basis der Messdaten mit numerischen Verfahren detailliert ermittelt. Im Verfahren wird getrennt voneinander, aber weitgehend analog die thermische Strahlung (nachfolgend auch als „langwellig“ bezeichnet) und die Solarstrahlung (nachfolgend auch als „kurzwellig“ oder „Globalstrahlung“ bezeichnet) synchron abgearbeitet.

ANISOTROPE STRAHLUNGSSUSZEPTIBILITÄT

Um die richtungsabhängige Strahlungssuszeptibilität des menschlichen Körpers möglichst genau abzubilden, wurde ein dreidimensionales CAD-Modell des menschlichen Körpers erstellt und die Oberflächen in die zwei Kategorien „Haut“ / „Kleidung“ unterteilt. Den so definierten Oberflächen wurden unterschiedliche Emissionsgrade ε (langwellig, „lw“) und der kurzwellige Absorptionskoeffizienten α („sw“) zugeordnet. Für Hautflächen, werden die in der Literatur üblichen Werte herangezogen, für die textilen Oberflächen reduzierte Werte verwendet, welche den durchschnittlichen Absorptionseigenschaften üblicher Textilien besser entsprechen. (Zhang et al., 2009) (Watanabe, 2009)

Tabelle 1: angewendete Absorptionskoeff. (sw) und Emissionsgrade (lw)

PARAMETER	HAUT	KLEIDUNG
ε (lw)	0,97	0,80
α (sw)	0,70	0,50

Zur Bestimmung der gesamten Strahlungsbilanz, welche zur Ermittlung der mittleren Strahlungstemperatur dient, ist es notwendig auf Basis dieser Annahmen sowohl die integralen effektiven Strahlungsflächen A_{eff} als auch die Richtungsabhängigkeit der Strahlungssuszeptibilität zu ermitteln.

Hierzu wird eine gewichtete Summe über das gesamte 3d-Modell des menschlichen Dummys errechnet. Die Gewichtungsfaktoren bilden die „Strahlungsaktivität“ der einzelnen Oberflächen ab. Einerseits werden diese durch die Absorptionskonstanten ε bzw. α gebildet, andererseits durch die ein Integral, welches die „Eigenverschattung“ durch das Modell abbildet. Hierzu wird eine Sichtbarkeitsfunktion v eingeführt, welche für Einstrahlungsrichtungen die durch das Modell selbst obstruiert sind den Wert 0 annimmt, da kein Strahlungsaustausch mit der Umgebung stattfindet. Für nicht obstruierte Richtungen hat v den Wert 1. Unter der Annahme von Lambert’schen Oberflächeneigenschaften, welche für die betreffenden Oberflächen eine gute Näherung darstellen, muss zur korrekten Berücksichtigung aller Raumrichtungen das nach dem Kosinusetz gewichtete hemisphärische

Integral über dem jeweiligen Oberflächensegment A_i gelöst werden.

$$(1) A_{eff,lw} = \sum_i \varepsilon_i \int_{A_i} \int_{\Omega} \frac{\cos\theta}{\pi} \cdot v(\omega, p) \cdot d\omega dA = \int_x \int_y \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \frac{\cos\theta}{\pi} \cdot v(\varphi, \theta, x, y) \cdot \sin(\theta) d\theta d\varphi dy dx$$

analog: $(2) A_{eff,sw} = \sum_i \alpha_i \dots$

Die Integrale für die langwellige und die kurzwellige Einstrahlung unterscheiden sich lediglich durch die Absorptionskoeffizienten ε_i bzw. α_i der einzelnen Subflächen.

Die Mehrfachintegrale wurden mit Hilfe von Monte-Carlo Integration numerisch mit einer Auflösung von fünf Milliarden Samplingpunkten gelöst.

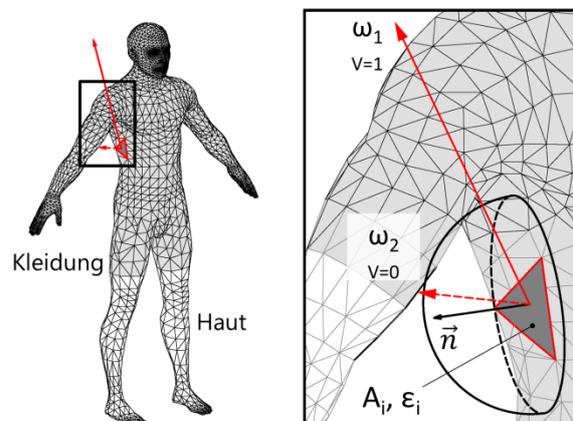


Abbildung 1: Ermittlung der effektiven Strahlungsflächen

Das hier vorgestellte Verfahren unterscheidet sich von gängigen Verfahren (Herrmann et al., 2010) (Lindberg et al., 2008) dadurch, dass die Anisotropie der Körperoberfläche nicht nur bei der Komponente der direkten Sonneinstrahlung berücksichtigt wird, sondern die anisotrope Suszeptibilität auch für die langwelligeren und kurzwelligeren Diffuskomponenten zur Anwendung gelangen. Für diesen Zweck wird auf Basis des eben beschriebenen Modells die richtungsspezifische Strahlungssensitivität als Funktion ermittelt. Hierzu kann bildlich gesprochen gemäß dem Prinzip der Umkehrbarkeit des Strahlengangs die Oberfläche als diffuser Emitter angesehen werden. Die spezifische Ausstrahlung der einzelnen Oberflächensegmente i ist jeweils proportional zu den Koeffizienten ε_i (langwellig) bzw. α_i (kurzwellig). Die zweidimensionale Suszeptibilitätsfunktion $S_{2D}(\varphi, \theta)$ entspricht der normierten räumlichen Verteilung der daraus resultierenden Strahlungsdichte. Da nur die Richtung und nicht die Lage der einzelnen Strahlen berücksichtigt wird, ist diese quasi für einen unendlich großen Abstand bestimmt. Da die Verteilung mit dem Abstand jedoch schnell konvergiert, kann diese Funktion auch für den Nahebereich herangezogen werden. Die so ermittelten Funktionen, welche in der

Polardarstellung eine „erdnussförmige“ Gestalt aufweisen, werden ausgehend vom Körperschwerpunkt für das Sampling der mittleren Strahlungstemperatur herangezogen. Wird die Verteilung nicht normiert so stellt diese die effektive projizierte Fläche $P_{2D}(\varphi, \theta)$ der menschlichen Dummies in die einzelnen Raumrichtungen dar (mit der Einheit Quadratmeter).

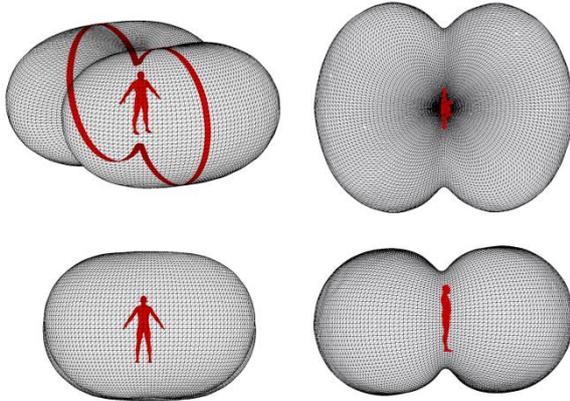


Abbildung 2: 3d Polar-Diagramm der Funktion anisotropen Strahlungssuszeptibilität $S_{2D,sw}(\varphi, \theta)$

Da für die praktische Anwendung die Verwendung der zweidimensionalen Funktion ungeeignet ist - da eine konkrete Orientierung der Person vorgegeben werden müsste - wird eine Mittelung über alle Richtungen φ vorgenommen - entsprechend einer Drehung des Dummies um seine Vertikalachse. Die so erhaltenen verallgemeinerten, rotationssymmetrischen Funktionen $S_{lw}(\theta)$, $S_{sw}(\theta)$ bzw. $P_{sw}(\theta)$ werden für das hier vorgestellte Verfahren herangezogen.

Als Referenz wurde ein Vergleich mit der gebräuchlichen Funktion $f_p(\theta)$ welche vom Sonnenstand abhängig die projizierte Fläche des menschlichen Körpers nach Fanger (FANGER PO et al., 1970) beschreibt, durchgeführt. Da $f_p(\theta)$ lediglich zur Gewichtung des direkten Sonneneinfalls herangezogen wird, ist die Funktion nur für die obere Hemisphäre ($\theta > 0^\circ$) definiert.

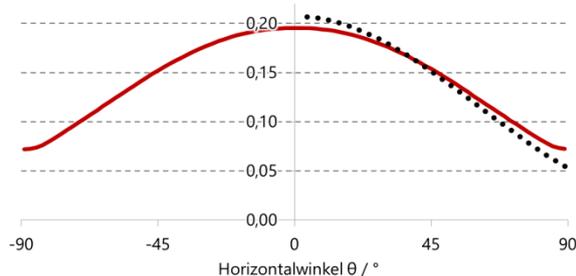


Abbildung 3: Vergleich kurzwellige Suszeptibilität $1/A_{eff,lw} \cdot P_{sw}(\theta)$ (rot) mit $\alpha_{eff} \cdot \epsilon_{eff} \cdot f_p$ nach Fanger (schwarz punktiert)

Für den direkten Vergleich wird die Funktion f_p nach Fanger mit den effektiven Absorptionskoeffizienten $\alpha_{eff}=0,591$ und $\epsilon_{eff}=0,877$ entsprechend unserem Humanmodell gewichtet.

Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung. Die Variabilität unseres Modells ist im Vergleich zur projizierten Fläche nach Fanger etwas reduziert.

BEFLIEGUNG - MESSUNG DER SPEZIFISCHEN AUSSTRAHLUNG

Zur Ermittlung der thermischen Ausstrahlung aller Oberflächen („langwellige Strahlung“), sowie der an den Oberflächen reflektieren Globalstrahlung („kurzwellige Strahlung“) werden sogenannte UAVs eingesetzt. Die Drohnen sind mit einer vollradiometrischen Infrarotkamera, sowie mit einer RGB- oder Hyperspektralkamera ausgestattet.

Für die angestrebte Auswertung im Bodenbereich könnte grundsätzlich auch auf den Einsatz von Drohnen verzichtet werden, da nur die Ausstrahlung der vom Boden aus einsehbaren Oberflächen relevant ist. Die Befliegung mit Drohnen ist jedoch wesentlich effizienter und zusätzliche gewonnene Daten, etwa Dachtemperaturen, können für andere mikroklimatische Untersuchungen herangezogen werden. Ein wesentlicher Vorteil des Einsatzes von Drohnen besteht in der außerordentlich geringen Zeitspanne welche für die Befliegung notwendig ist. Dies ist für die hier durchgeführte Auswertung vorteilhaft, da sich die Umgebungsbedingungen in der benötigten Zeit nur geringfügig ändern.

Lambert-Strahler Annahme

Sowohl bei der Ermittlung der spezifischen Ausstrahlung der einzelnen Oberflächen, als auch bei der späteren rechnerischen Ermittlung der mittleren Strahlungstemperaturen im Raytracing-Verfahren werden idealisierte Oberflächen im Sinne des Lambert'schen Gesetzes vorausgesetzt, d.h. dass die Strahlungstärke I entsprechend dem Kosinusetz in alle Raumrichtungen abgestrahlt wird: $I(\theta) = L \cdot A \cdot \cos\theta$. Die Strahldichte $L = I(\theta)/(A \cdot \cos\theta)$ ist somit eine Konstante, welche – wie durch Integration über den Halbraum gezeigt werden kann - mit der spezifischen Ausstrahlung M [W/m²] wie folgt in Relation steht: $L = M/\pi$. Im Folgenden wird deshalb vereinfachend nur noch auf die spezifischen Ausstrahlungen E_{lw} und E_{sw} Bezug genommen, obwohl sowohl für die Detektion, als auch für das Sampling im Raytracingverfahren die Strahldichte ausschlaggebend ist. Der konstante Proportionalitätsfaktor π welcher die beiden Größen verknüpft, wird im Algorithmus an den entsprechenden Stellen berücksichtigt.

Auswertung langwellige Ausstrahlung

Die von den Pixeln der vollradiometrischen Infrarotkamera gelieferten Messwerte können direkt als Maß für die thermische Ausstrahlung der einzelnen Flächen herangezogen werden. Für die weitere Bearbeitung ist die Intensität, also die spezifische Ausstrahlung [W/m²] der Wärmestrahlung entscheidend. Es ist also nicht die tatsächliche Oberflächentemperatur, sondern die sogenannte Brightness-Temperatur relevant. Sie entspricht jener Temperatur, welcher ein sogenannter schwarzer Strahler ($\epsilon=1$) aufweisen müsste, um die entsprechende Strahlung zu emittieren. Eine Kenntnis der Emissionsgrade der einzelnen Oberflächen ist

deshalb grundsätzlich nicht notwendig. Das Verfahren setzt lediglich die spektrale Konstanz des Emissionsgrades voraus („graue Strahler“). Im thermisch relevanten Spektralbereich bzw. im Detektorbereich von 7,5 – 14µm, trifft dies für die urbanen Oberflächen und die Vegetation gut zu.

Das Verfahren setzt zudem - wie oben erwähnt - voraus, dass sich alle Oberflächen wie perfekte diffuse Strahler verhalten. Die beiden getroffenen Annahmen „grauer Strahler“ (konstanter Emissionsgrad bzgl. Wellenlänge) bzw. „diffuser Strahler“ (konstanter Emissionsgrad bzgl. Abstrahlrichtung) – werden bei thermographischen Auswertungen üblicherweise vorausgesetzt, da sie einerseits wesentliche Vereinfachungen des Berechnungsvorgangs gestatten, und andererseits für mineralische und natürliche raue Oberflächen gut zutreffend sind.

Die größte Abweichung hinsichtlich der getroffenen Annahmen tritt im vorliegenden Verfahren bei den glatten Oberflächen der Verglasungen auf. Für Umgebungen, bei denen Glasflächen signifikante Anteile aller Oberflächen ausmachen, ist eine Weiterentwicklung des Verfahrens zur Berücksichtigung der gerichteten Reflexion - welche insbesondere bei flachen Einfallswinkeln dominant ist - möglich. Voraussetzung hierfür ist eine entsprechende Klassifizierung der Oberflächen als Glasoberflächen im verwendeten Stadtmodell.

Auswertung kurzweilige Ausstrahlung (Reflexion)

Während die im langwelligen Bereich detektierte spezifische Ausstrahlung zum Großteil von den Oberflächen selbst emittiert wird und nur einen geringen Anteil an (diffus) reflektierter Wärmestrahlung enthält, ist die hier als „kurzweilige spezifische Ausstrahlung“ bezeichnete Komponente zur Gänze als diffuse Reflexion der eintreffenden Globalstrahlung zu verstehen. Wiederum werden ideal diffus reflektierende Oberflächen nach dem Lambert'schen Gesetz vorausgesetzt. Ähnlich wie bei der langwelligen thermischen Strahlung stellt diese Annahme für die hier relevanten Oberflächen eine akzeptable Näherung dar. Eine vertiefte Betrachtung müsste sowohl bei der Detektion der Ausstrahlung, als auch bei der späteren Berechnung der Einstrahlung die bidirektionale Reflektanzverteilungsfunktionen (BRDF) aller Oberflächen spezifisch berücksichtigen.

Hierfür wäre eine Klassifizierung der Oberflächen im Modell, sowie eine genaue Ermittlung und Zuordnung der relevanten BRDF Funktionen für die einzelnen Materialien notwendig. Dies wäre jedoch mit erheblichem Aufwand verbunden. Wiederum analog zur langwelligen Betrachtung wäre zumindest die gesonderte Betrachtung des gerichteten Reflexionsanteils von Metall und Glasoberflächen als zukünftiger Verfeinerungsschritt sinnvoll.

Zur Detektion der kurzwelligen Ausstrahlung (diffusen Reflexion) wird idealerweise eine Hyperspektralkamera eingesetzt, welche einen möglichst großen Globalstrahlungsbereich von ca. 300nm bis ca. 2500nm spektral hochaufgelöst erfassen kann. Eine gute Näherung kann jedoch auch mit Multispektralkameras, die neben den RGB-Kanälen meist einen zusätzlichen Kanal im nahen Infrarot besitzen, erfasst werden. Ban-Weiss (Ban-Weiss et al., 2014) konnte bei Albedo-Bestimmungen von Dächern zeigen, dass sich mit herkömmlichen RGB-Kameras brauchbare Näherungen erzielen lassen. Lediglich für bestimmte, im sichtbaren Bereich schwach reflektierende Dächer, brachte der Einsatz einer Multispektralkamera mit zusätzlichem NIR-Kanal signifikante Vorteile.

Allgemein formuliert kann die gemessene Abstrahlung als gewichtete Summe der einzelnen Signale s_i auf unterschiedlichen Spektralkanälen formuliert werden.

$$(3) E_{sw} = \sum C_i s_i^{a_i}$$

Die Faktoren C_i gemeinsam mit den Exponenten a_i beschreiben die Sensorempfindlichkeit. In der Regel liegt eine relative gute Linearität des Sensorsignals vor ($a=1$). Da die Anzahl der einzelnen Kanäle beschränkt ist und diese jeweils nur relativ schmale Bänder des Spektrums abdecken, handelt es sich selbst bei idealer Kalibrierung immer nur um ein Näherungsverfahren.

Beim hier präsentierten Anwendungsfall wurde eine handelsübliche RGB-Kamera eingesetzt und die folgende Vereinfachung bei der Berechnung der spezifischen Ausstrahlung durchgeführt:

$$(4) E_{sw} = C_{rgb} \frac{s_r + s_g + s_b}{3}$$

Es wurde somit durch Mittelung der RGB-Kanäle ein Helligkeitswert definiert und dieser mittels des Faktors C_{rgb} linear-proportional in die gesuchte spezifische Ausstrahlung umgerechnet. Die Konstante C_{rgb} kann mit Hilfe eines Kalibriertargets ermittelt, oder – wie von uns angewendet – durch Abgleich mit mehreren Bodenmessungen mit Hilfe von Pyranometern. Die eingesetzte Kamera muss naturgemäß hierfür über einen statischen, nicht-adaptiven Modus verfügen.

Obwohl in unserem Verfahren für die Ermittlung der diffus-reflektierten kurzwelligen Strahlung urbaner Oberflächen eine Reihe von Vereinfachungen notwendig sind, stellt die Methode eine signifikante

Verfeinerung zu gängigen Verfahren dar, bei welchen dieser Anteil entweder nicht explizit, oder nur als konstanter Anteil der direkten Sonneneinstrahlung berücksichtigt wird. Quantitativ spielt die kurzwellige Einstrahlung aus Reflexion an Oberflächen in der Regel eine eher untergeordnete Rolle. Folglich sind auch die Auswirkungen der getroffenen Vereinfachungen auf den Gesamtfehler der Bestimmung der mittleren Strahlungstemperatur und des daraus abgeleiteten Komfortindizes begrenzt.

ABBILDUNG DER SPEZIFISCHEN AUSSTRAHLUNG AUF EIN 3D-MODELL

Bei der Befliegung mit der Drohne wird eine umfangreiche Serie an zweidimensionalen Bildaufnahmen erstellt. Diese enthalten, wie oben beschrieben, einerseits die langwellige thermische Abstrahlung und andererseits die kurzwellige Abstrahlung (als Reflexionsstrahlung) aller einsehbaren Oberflächen (Gebäude, Vegetation, versiegelte und nicht versiegelte Bodenflächen). Zusätzlich wird für das Verfahren ein möglichst dreidimensionales Stadtmodell in ausreichender Genauigkeit benötigt.

Fotogrammetrie

Im ersten Schritt werden die georeferenzierten Bildserien der Befliegung mit Hilfe von fotogrammetrischen Verfahren in dreidimensionale Punktwolken umgewandelt. Zur exakten räumlichen Ausrichtung und Entzerrung der Daten wird das Modell georeferenziert, d.h. die Koordinaten von einzelnen charakteristischen Punkten werden in Lage, als auch Höhe dem Stadtmodell entnommen und den fotogrammetrischen Routinen als Fixpunkte vorgegeben. Die notwendigen Berechnungen können mit Hilfe von kommerziellen Softwarelösungen durchgeführt werden, sind jedoch sehr rechenintensiv. Entscheidend für das Verfahren sind ausreichend kontrastreiche Aufnahmen. Bei den thermographischen Aufnahmen spiegeln diese die Strahlungstemperaturen der einzelnen Oberflächen wider, deshalb können bei geometrisch sehr differenzierten Bereichen, wie etwa Gebäudekanten, unter Umständen nur sehr geringe Kontraste auftreten. Eine hohe Auflösung der Thermographiekamera, sowie Erfahrung im Umgang mit fotogrammetrischen Auswertungen ist somit notwendig. Die Anwendung der fotogrammetrischen Verfahren an thermografischen Aufnahmen ist daher wesentlich aufwändiger und komplexer, kommerzielle Softwarelösungen stoßen hierbei schnell an ihre Grenzen. Umso mehr ist eine sorgfältige Flugplanung, mit gut gewählten Bildüberlappungsbereichen, sowie eine zweckmäßige Unterteilung in Prozessierungsblöcke notwendig.

Im nächsten Schritt werden die aus den RGB-Daten erstellten Punktwolken in dreidimensionale, triang

ulierte Gitternetze umgewandelt. Auch hierfür werden Standardverfahren kommerzieller Software eingesetzt. Dieser Schritt ist notwendig, da die Vegetation (Bäume und Buschwerk) im 3d-Stadtmodell nicht, oder nur unzureichend, abgebildet wird. Zur Komplettierung des Stadtmodells wird die relevante Vegetation „manuell“ aus dem fotogrammetrisch erstellten Gitternetz extrahiert und als zusätzliche Ebene in das bestehende Stadtmodell integriert.

In einem alternativen Ansatz könnte anstelle des 3d-Stadtmodells auch das gesamte erzeugte Gitternetz für die weiteren Berechnungen eingesetzt werden. Der Mehrwert dieses Ansatzes liegt darin, dass das so erstellte Gitternetz aktueller ist und alle Objekte enthält. Der Vorteil bei der Verwendung eines bestehenden Stadtmodells begründet sich in der größeren Klarheit, d.h. einer deutlich geringeren Anzahl an Subflächen und insbesondere in der Verfügbarkeit zusätzlicher semantischer Attribute. D.h. die einzelnen Oberflächen des Modells liegen bereits klassifiziert vor („Fassade“, „Dach“, „Bodenfläche“ etc.). Die zusätzliche Klassifizierung erlaubt einerseits tiefergehende zusätzliche Analysen und andererseits eine Verknüpfung der gemessenen Daten mit dem Stadtmodell, etwa auf Basis des CityGML-Formats.

Abbildung auf das Modell

Im weiteren Bearbeitungsschritt werden die den Punktdaten entsprechenden spezifischen Ausstrahlungswerte auf die Oberflächen des – mit einem neuen Vegetationslayer angereicherten – Stadtmodells abgebildet. Für diesen Prozessschritt wurde ein spezielles Verfahren entwickelt und als Algorithmus implementiert. Zunächst wird das Stadtmodell automatisch verfeinert, d.h. große Subflächen werden so lange unterteilt, bis die gewünschte maximale Dimensionsvorgabe, i.d.R. einige Meter, von allen Kanten aller Subflächen unterschritten wird.

Im nächsten Schritt werden auf Basis von geeignet gewählten Toleranzen, in Form von Abstands-schwellwerten, die sich im Nahebereich befindlichen Punktdaten einzelnen Subflächen zugeordnet. Je nach Gestalt und Größe der Fläche wird hierfür entweder der Minimalabstand oder der Normalabstand als Kriterium herangezogen.

Im letzten Prozessschritt werden die Intensitätswerte der jeweils den Subflächen zugeordneten Punkten gemittelt. Bei einer geringen Anzahl von Punkten erfolgt eine einfache arithmetische Mittelung. Stehen für eine Subfläche viele Punkte zur Verfügung, so wird zur Erhöhung der Genauigkeit eine bilineare Interpolation durchgeführt. Die Information der kurz- und langwelligen spezifischen Ausstrahlung der einzelnen Subflächen liegt also entweder als konstanter Wert oder in Form eines räumlich orientierten Gradienten vor.

ABBILDUNG DER DIFFUSEN HIMMELSTRAHLUNG UND DIREKTEN SONNENEINSTRALUNG

Das eben beschriebene Verfahren wird für alle Boden-, Gebäude- oder Vegetationsflächen angewendet. Für die direkte Solarstrahlung und diffuse Einstrahlung aus dem Himmel werden, sowohl kurzwellig als auch langwellig, modellhafte Beschreibungen gewählt. Einerseits da die messtechnische Erfassung notwendigen Voraussetzungen „Lambert-Strahler“ und „grauer Strahler“ für die Atmosphäre nur mehr bedingt erfüllt sind, und andererseits, weil hierfür brauchbare Modelle zur Verfügung stehen. Die mit dem Modell ermittelten Werte können zudem einerseits durch Messungen mit Pyranometer oder Pyrgeometer validiert bzw. abgeglichen werden, andererseits gestattet es die modellhafte Abbildung einfach Variationen der Himmelseinstrahlung durchzuführen. Für beide Komponenten wurde jeweils ein einfaches, isotropes Beschreibungsmodell gewählt.

Für die langwellige Ausstrahlung aus der Atmosphäre, die sogenannte atmosphärische Gegenstrahlung, ist dies die gebräuchliche Ångström-Formel (VDI, 1994)

$$(5) E_{sky, lw} = \sigma \cdot T^4 \cdot (0.82 - 0.25 \cdot 10^{-0.0945 p}) \cdot \left[1 + 0.21 \left(\frac{N}{8} \right)^{2.5} \right]$$

Wobei T die Lufttemperatur am Boden, p der Wasserdampfpartialdruck am Boden und N der aktuelle Gesamtbedeckungsgrad in Achtel (0-8) ist.

Zur Abbildung der kurzwelligen Globalstrahlung gilt es die diffusen und direkten Anteile der Sonneneinstrahlung zu berücksichtigen. Wiederum wird für die diffuse Sonneneinstrahlung ein einfaches isotropes Modell verwendet. Für die Aufteilung in diffuse und direkte Sonneneinstrahlung wird auf Basis von Messdaten mittels Pyranometer, dem Sonnenstand und dem Reindl-Verfahrens (Reindl et al., 1990) eine Aufteilung in Diffus- ($E_{sky, sw}$) und Direktstrahlung (I_{dir}) vorgenommen. Der Sonnenstand wird auf Basis der geodätischen Koordinaten und der Uhrzeit mit Hilfe des SG2-Algorithmus (Blanc et al., 2012) exakt berechnet.

ERMITTLUNG DER MITTLEREN STRALUNGSTEMPERATUR

Ziel des Verfahrens ist es den wesentlichen Parameter mittlere Strahlungstemperatur T_{MRT} möglichst exakt zu ermitteln. Bei den gängigen Outdoor-Thermal-Comfort Verfahren wird die humane Topologie lediglich zur Ermittlung des Beitrages der direkten Sonneneinstrahlung durch eine sonnenstandsabhängige Funktion $fp(\theta)$ berücksichtigt, meist nach Fanger (FANGER PO et al., 1970), welche die projizierte Fläche eines menschlichen Körpers abbildet. In manchen numerischen Ansätzen (Tanabe et al., 2000)(Kubaha et al., 2004)

werden zusätzlich Integrale über $fp(\theta)$ für vereinfachte Berücksichtigung von reflektierter Globalstrahlung vom Boden, diffuser Himmelseinstrahlung oder rechteckige Bereiche berücksichtigt. In unserem Verfahren wird dieser Ansatz verfeinert und verallgemeinert, d.h. sowohl die humane Topologie, als auch das inhomogene Einstrahlungsprofil der Umgebung wird detailliert bei der Ermittlung sowohl der langwelligen, als auch der kurzwelligen Komponenten berücksichtigt. Zur Differenzierung zum herkömmlichen Ansatz, bezeichnen wir die so erhaltene mittlere Strahlungstemperatur als T_{SMRT} (sampled mean radiant temperature).

Zur effizienten Bestimmung der beiden diffusen Anteile der Strahlungstemperatur wird ein Monte-Carlo Verfahren eingesetzt. Hierbei handelt es sich um ein numerisches, stochastisches Verfahren, welches sich sehr gut zur effizienten Lösung mehrdimensionaler Integrale eignet. Die anhand des menschlichen Modells erhaltenen normierten Suszeptibilitätsfunktionen $S_{lw}(\theta)$ bzw. $S_{sw}(\theta)$ werden hierbei als Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen für den Elevationswinkel θ zur Erstellung von zufälligen Sampling-Richtungen ($X_{lw,i}$ $X_{sw,i}$) herangezogen. Azimutal (bzgl. des Winkels φ) sind die Richtungen gleichverteilt. Die Methode ist sehr effizient, da auf diese Weise die Anzahl der notwendigen Strahlverfolgungen im Raytracing zur Erreichung einer vorgegebenen Genauigkeit Verfahren minimal wird.

Die Suszeptibilitätsfunktionen S kommen deshalb im Ausdruck (6) zur Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur T_{SMRT} nicht explizit vor, sondern gehen implizit in die Verteilung der Samplingrichtungen X ein.

Schließlich können wir entsprechend dem von uns gewählten Ansatz die so ermittelte Strahlungstemperatur T_{SMRT} wie folgt formulieren:

$$(6) T_{SMRT} = \left[\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{lw}(X_{lw,i}) + \frac{A_{eff,sw}}{A_{eff,lw}} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{sw}(Y_{sw,i}) + \delta_{shadow} \frac{1}{A_{eff,lw}} P_{sw}(\theta_{sun}) I_{dir} \right) \right]^{1/4}$$

Die ersten beiden Summanden beschreiben die Ermittlung der diffusen Komponenten anhand des Raytracingverfahrens. Basierend auf dem Stadtmodell, welches die lang- und kurzwelligen Strahlungsintensitäten der relevanten Oberflächen enthält, und entsprechend der oben eingeführten humanen Strahlungssuszeptibilitätsfunktionen S_{lw} und S_{sw} gewichteten, großen Menge der Samplingrichtungen X werden mit Hilfe eines Raytracing-Algorithmus die mittleren diffusen Einstrahlungswerte errechnet. Gerichtete Reflexionen werden im derzeitigen Verfahren nicht berücksichtigt. Diffuse Reflexionsanteile werden – unter der getroffenen Annahme der

streng Lambert'schen Oberflächeneigenschaften – implizit berücksichtigt, da diese in den messtechnisch ermittelten Intensitäten bereits enthalten sind.

Da das Verfahren variable Absorptionskoeffizienten (α_i, ε_i) für die Oberflächen des menschlichen Modells gestattet, wird der in bisherigen Ansätzen verwendete Quotient α/ε verallgemeinert als $A_{eff,sw}/A_{eff,lw}$ abgebildet (alternativ und äquivalent könnte ein effektiver Emissionsgrad bzw. ein effektiver Absorptionskoeffizient verwendet werden). Der Quotient spiegelt die Proportionalität zwischen der eingestrahnten kurzwelligigen Leistung und der dadurch zusätzlich abgestrahlten langwelligigen Leistung im betrachteten Fall des Strahlungsgleichgewichts wider. Der dritte Term in Gleichung (6) bildet den Einfluss der direkten Sonnenstrahlung ab. Die Funktion δ_{shadow} nimmt im Schatten den Wert 0 und bei direkter Sonneneinstrahlung den Wert 1 an. Der Wert wird durch ein Raytracing-Sample in Richtung des aktuellen Sonnenstands festgelegt. Der Proportionalitätsfaktor bei diesem Term reduziert sich zu $1/A_{eff,lw}$ da die Gewichtungsfunktion $P_{sw}(\theta)$ die für die kurzwellige Strahlung die effektive, projizierte Fläche bereits implizit enthält.

BERECHNUNG DER THERMISCHEN KOMFORTINDIZES

Zur Ermittlung des thermischen Komforts kann die oben erläuterte Berechnung der Strahlungstemperatur T_{SMRT} hochaufgelöst für jeden Punkt innerhalb des detektierten Gebiets durchgeführt werden. Obwohl eine dreidimensionale Auswertung möglich ist, werden die Berechnungen zweckentsprechend nur zweidimensional für eine „Fußgängerebene“ in 1,1 m Höhe über dem jeweiligen Bodenniveau durchgeführt. Die Berechnung wird mit einer Rasterschrittweite von 1x1 m durchgeführt. An jedem Punkt des Rasters wird das Raytracing-Verfahren zur Ermittlung von T_{SMRT} durchgeführt. Die so ermittelte Strahlungstemperatur stellt gemeinsam mit der Lufttemperatur, dem Wasserdampfpartialdruck und der Strömungsgeschwindigkeit der Luft die Eingangsparameter zur Berechnung des lokalen UTCI-Index (z.B. Błazejczyk et al., 2013) dar. Dieser spiegelt eine empfundene Temperatur wider und wurde zur objektiven Bewertung von thermischem Komfort, bzw. thermischer Stressbelastung entwickelt. Für die alternative Berechnung des thermischen Komforts gemäß PMV-Index nach Fanger, ist lediglich die ergänzende Festlegung einer Stoffwechselrate, sowie eines Bekleidungsfaktors notwendig.

Die orts aufgelöste Bestimmung oder Beschreibung der Eigenschaften des Luftkörpers, definiert durch Lufttemperatur, Luftfeuchte (Wasserdampfpartialdruck) und Strömungsgeschwindigkeiten, stellt eine große Herausforderung dar. Eine Intra- und Extrapolation von Messdaten auf Basis weniger Messungen

ist schwierig, alternativ könnten Daten aus zusätzlichen CFD-Simulationen integriert werden.

Entsprechend der einleitend angeführten Arbeitshypothese, ist die Variabilität der Luftkörpereigenschaften in Vergleich zur Variabilität der Strahlungstemperatur bei innerstädtischen Gebieten, insbesondere bei Untersuchung von sommerlichen Belastungsszenarien, vergleichsweise gering. Aus diesem Grunde können die Luftkörpereigenschaften für kleinräumig untersuchte Bereiche als konstant angenommen werden. Bei den Messungen zu unserer Fallstudie unter hochsommerlichen Bedingungen konnten diese Annahmen gut belegt werden. Es ist auch anzumerken, dass etwa der Effekt der kühlenden Wirkung einer Luftströmung mit zunehmender Lufttemperatur geringer wird. Proportional sinkt auch die Notwendigkeit der exakten Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit.

ANWENDUNG / FALLSTUDIE GRAZ

Zur Evaluierung unseres Ansatzes wurde die gesamte Prozesskette auf ein innerstädtisches Quartier im Bereich des Platzes „Eisernes Tor“ in Graz, Österreich angewendet. Das Gebiet liegt im Zentrum der Stadt, umfasst historische Gebäude (mit Giebelhöhen bis 30m), einen befahrenen Straßenzug und umfangreiche Fußgängerzonen. Zudem ist das untersuchte Zielgebiet durch eine Vielzahl an z.T. hochwüchsigem Baumbestand gekennzeichnet.

Die Befliegung wurde am 20. August 2019 in der Zeit von 14:15 bis 14:35 durchgeführt. Auf Grund der begrenzten Flugzeit war ein kurzer Zwischenstopp zum Auswechseln der Akkumulatoren notwendig. Zur thermographischen Detektion wurde eine Kamera vom Typ FLIR-T1020 an der Drohne angebracht. Synchron wurden Aufnahmen mit der RGB-Kamera GoPro Hero 6 durchgeführt.

Zeitgleich zur Befliegung wurden an 15 Standorten Messungen der Lufttemperatur, Luftfeuchte und Strömungsgeschwindigkeit der Luft durchgeführt. Auf Grund eines Sensorfehlers konnten die Werte für die Luftfeuchte nicht ausgewertet werden. Aus diesem Grunde wurde der Messwert einer nahegelegenen offiziellen Messstation, mit vergleichbarem Temperaturwert für die Auswertung verwendet. Der Wasserdampfpartialdruck betrug 1726 Pa bei 29,45 °C.

Die Spotmessungen am Boden (in 1,5 m Höhe) wurden an sehr unterschiedlich exponierten Standorten, welche von sonnigem Standort am versiegelten Platz bis zur Messung im Schatten im Park reichen, durchgeführt. Dennoch lagen die ermittelten Lufttemperaturen in einer sehr engen Bandbreite mit Standardabweichung 0,54 °C um den Mittelwert 29,45 °C verteilt. Die Strömungsgeschwindigkeit der Luft wurde mittels omnidirektionalem Anemometer zu (1,29±0,56) m/s bestimmt.

Tabelle 2: Ergebnisse der Spotmessungen

Standort	von	bis	T _{air} / °C	v _{air} / m/s
MP1	14:43:36	14:44:05	28,95	1,00
MP2	14:09:41	14:10:10	28,54	0,70
MP3	14:34:51	14:35:20	29,19	1,55
MP4	14:33:11	14:33:40	29,79	0,59
MP5	14:31:21	14:31:50	29,77	0,73
MP6	14:27:31	14:28:00	30,00	1,19
MP7	14:28:41	14:29:10	29,68	0,87
MP8	14:22:11	14:22:40	29,39	0,70
MP9	14:24:26	14:24:55	30,47	1,14
MP10	14:25:51	14:26:20	29,91	1,20
MP11	14:36:01	14:36:30	28,93	2,42
MP12	14:37:51	14:38:20	29,12	1,76
MP13	14:41:06	14:41:35	29,41	2,09
MP14	14:42:11	14:42:40	28,76	1,93
MP15	14:40:01	14:40:30	29,87	1,45
Mittelwert:			29,45	1,29
Std.abw.:			0,54	0,56
Max:			30,47	2,42
Min:			28,54	0,59

Der Bewölkungsgrad des Himmels wurde als heiter eingestuft (N=2/8). Zusätzlich wurde an jedem Messpunkt die Globalstrahlung auf die Horizontale mittels Pyranometer bestimmt. Diese Daten wurden zur Kalibrierung der Einstrahlungsparameter herangezogen. Die Einstrahlungswerte auf die Horizontale setzen sich aus Direkt-, Diffus und Reflexionsstrahlung zusammen. Auf Basis unseres Berechnungsverfahrens können auch quasi virtuelle Messungen der kurzwelligen Einstrahlung im Modell durchgeführt werden. Hierzu wird anstelle der humanen Samplingfunktionen, eine Kosinus-gewichtete Samplingfunktion eingesetzt um entsprechend dem Pyranometer-Messprinzip die Einstrahlung auf die Horizontale zu ermitteln. Der Vergleich gibt Aufschluss über die Qualität des Modells hinsichtlich der Abbildung des kurzwelligen Strahlungsanteils.

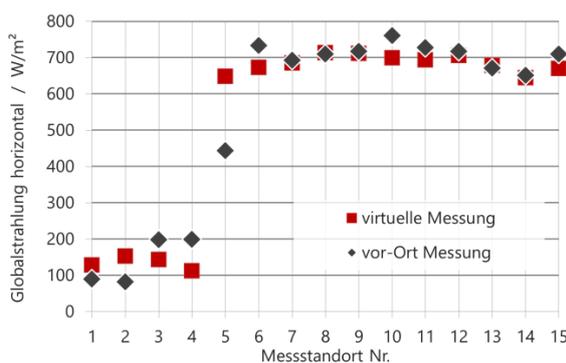


Abbildung 4: Vergleich der im Modell errechneten Werte der kurzwelligen Einstrahlung (GHI) vs. Vor-Ort Messungen mit Pyranometer

Die auftretenden Abweichungen sind auf naturgemäß vorhandene Unterschiede hinsichtlich der exakten Geometrie (insbesondere bei der Vegetation), der

Reflexionseigenschaften der Oberflächen und des Detaillierungsgrades zurückzuführen. Zur Veranschaulichung der Arbeitshypothese, welche voraussetzt, dass die Variabilität der Strahlungstemperatur den dominanten Einfluss auf die Werte des thermischen Komforts ausübt, sind in *Abbildung* die im Verfahren ermittelten Strahlungstemperaturen im gesamten ausgewerteten Bereich in Form eines Histogramms dargestellt.

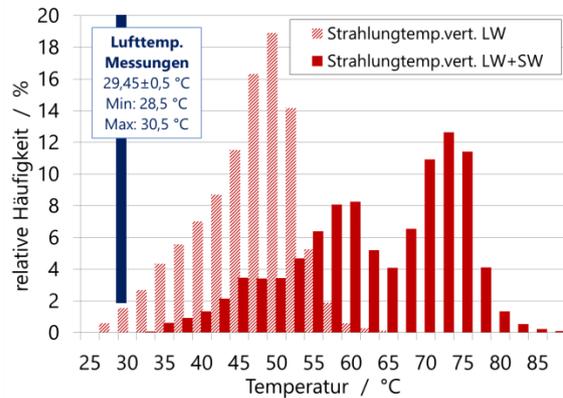


Abbildung 5: Verteilung der gemessenen Lufttemperaturen und berechneten mittleren Strahlungstemperaturen im untersuchten Bereich

Wie zu sehen ist, liegen alle gemessenen Lufttemperaturen in einem sehr engen Bereich um 29,5°C (±0,5 °C) verteilt, während die sich aus der thermischen Strahlung ergebenden mittleren Strahlungstemperaturen einen breiten Bereich bis ca. 65 °C abdecken. Berücksichtigt man zusätzlich die kurzwellige Einstrahlung so werden Werte bis über 80 °C erzielt.

Die räumliche aufgelöste Berechnung des thermischen Komfortindex UTCI ist in *Abbildung* dargestellt. Wie zu sehen ist, zeigt sich eine räumlich sehr differenzierte Verteilung. Die geringsten Werte werden im Bereich des Parks, sowie des am Platz vorhandenen Brunnens erzielt. Die höchsten Werte werden jeweils im Nahebereich vor sonnenexponierten Fassaden erzielt. Neben den dargestellten Absolutwerten des UTCI-Index, stellen auch die zugrundeliegenden Berechnungskomponenten eine sehr aufschlussreiche Informationsquelle dar. So können etwa auch die ermittelten mittleren Strahlungstemperaturen oder separat die kurzwelligen und langwelligen Einstrahlungswerte kartografisch dargestellt werden. Auch die absolute und relative Quantifizierung der einzelnen Komponenten stellen Werkzeuge zur Analyse des Istzustandes oder allfälliger Optimierungsmaßnahmen dar. Eine detaillierte Darstellung und Erläuterung dieser Analysemöglichkeiten würden den Umfang dieses Beitrages sprengen.



Abbildung 6: Darstellung der ermittelten UTCI-Werte für den thermischen Komfort, ausgewertet mit einer Rastergröße von 1x1 m für eine Höhe von 1,1 m über Bodenniveau

ZUSAMMENFASSUNG

Am Anwendungsfall Graz „Eisernes Tor“ konnte gezeigt werden, dass das entwickelte Verfahren praktikabel ist und aufschlussreiche Untersuchungen gestattet. Die Arbeitshypothese, dass der mittleren Strahlungstemperatur bei Evaluierung einer sommerlichen urbanen Umgebung zentrale Bedeutung zukommt konnte untermauert werden. Die hier abgeleiteten richtungsabhängigen Strahlungssuszeptibilitätsfunktionen belegen, dass die aus horizontalen Richtungen auf den Körper eintreffende Strahlung dominanter ist, als jene aus vertikalen Richtungen. Dies wiederum bestätigt die Notwendigkeit einer möglichst detaillierten und dreidimensionalen Betrachtung, da in urbanen Umgebungen vertikale Flächen (Fassaden, Vegetation) einen signifikanten Anteil aufweisen.

Die messtechnische Erfassung der lang- und kurzwelligen Ausstrahlung mit Hilfe von Drohnen hat sich auf Grund der Effizienz und der kurzen Messzeiten sehr gut bewährt. Bei der nächsten Anwendung des Verfahrens wird eine Hyperspektralkamera eingesetzt um die diffuse Reflexion der Globalstrahlung gesamthafter erfassen zu können.

Obwohl sehr rechenintensiv, hat sich das entwickelte Auswerteverfahren als sehr tauglich bewiesen und plausible und räumlich gut differenzierte Ergebnisse geliefert. Als weiterer Validierungsschritt soll versucht werden die Ergebnisse mit Hilfe von Schwarzkugelthermometern zu validieren. Unter den vorhandenen Umgebungsbedingungen (direkte und

diffuse Sonneneinstrahlung, variable und turbulente Strömungsverhältnisse etc.) stellt dies keine triviale Aufgabe dar. Aus diesem Grunde konnte dieser Validierungsschritt im Rahmen dieser ersten Anwendung nicht durchgeführt werden. Die Korrektheit des Algorithmus für das Einstrahlungssampling wurde jedoch anhand von analytisch bestimmaren einfachen Konfigurationen validiert.

Als nächste Weiterentwicklung des Berechnungsverfahrens soll die gerichtete Reflexion von Glasscheiben abgebildet werden und die Automatisierung des Verfahrens erhöht werden.

Zunächst sollen jedoch weitere Analysen aus den bereits im Verfahren errechneten Größen abgeleitet und in einer interaktiven Karte online verfügbar gemacht werden, z.B. die Strahlungstemperaturen der unterschiedlichen Oberflächen, die wirksamen Flächenanteile, die lokalen Sensitivitäten des thermischen Komforts hinsichtlich der Umgebungsvariablen und Strahlungskomponenten. Die so zur Verfügung gestellten Daten können eine wertvolle Datenbasis für die Planung oder Evaluierung von stadtplanerischen Maßnahmen darstellen.

DANKSAGUNG

Das Verfahren wurde im Rahmen des Projekts *SmaCiSe – Smart City Sensing* entwickelt, welches von Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH FFG ermöglicht wurde. Wir danken für die Unterstützung.

LITERATUR

- Ban-Weiss, George, Jordan Woods, and Ronnen Levinson. 2014. "Using Remote Sensing to Quantify Albedo of Roofs in Seven California Cities."
- Blanc, Ph, and L. Wald. 2012. "The SG2 Algorithm for a Fast and Accurate Computation of the Position of the Sun for Multi-Decadal Time Period." *Solar Energy* 86 (10): 3072–83.
- Błazejczyk, Krzysztof, Gerd Jendritzky, Peter Bröde, Dusan Fiala, George Havenith, Yoram Epstein, Agnieszka Psikuta, and Bernhard Kampmann. 2013. "An Introduction to the Universal Thermal Climate Index (UTCI)." *Geographia Polonica* 86 (1): 5–10.
- FANGER PO, ANGELIUS O, and KJERULF-JENSEN P. 1970. "Radiation Data for the Human Body." *ASHRAE Transactions* 76 (pt 2): 338–73.
- Herrmann, Jan, and Andreas Matzarakis. 2010. "Influence of Mean Radiant Temperature on Thermal Comfort of Humans in Idealized Urban Environments." *Berichte Des Meteorologischen Institute*, no. April 2010: 522–27.
- Huang, Jianxiang, Jose Guillermo Cedeño-Laurent, and John D. Spengler. 2014. "CityComfort+: A Simulation-Based Method for Predicting Mean Radiant Temperature in Dense Urban Areas." *Building and Environment* 80: 84–95.
- Kubaha, K., D. Fiala, J. Toftum, and A. H. Taki. 2004. "Human Projected Area Factors for Detailed Direct and Diffuse Solar Radiation Analysis." *International Journal of Biometeorology* 49 (2): 113–29.
- Lindberg, Fredrik, Björn Holmer, and Sofia Thorsson. 2008. "SOLWEIG 1.0 - Modelling Spatial Variations of 3D Radiant Fluxes and Mean Radiant Temperature in Complex Urban Settings." *International Journal of Biometeorology* 52 (7): 697–713.
- Matzarakis, Andreas, Frank Rutz, and Helmut Mayer. 2010. "Modelling Radiation Fluxes in Simple and Complex Environments: Basics of the RayMan Model." *International Journal of Biometeorology* 54 (2): 131–39.
- Rakha, Tarek, Pouya Zhand, and Christoph Reinhart. 2017. "A Framework for Outdoor Mean Radiant Temperature Simulation: Towards Spatially Resolved Thermal Comfort Mapping in Urban Spaces." *Building Simulation 2007, Vols 1-3, Proceedings*.
- Reindl, D. T., W. A. Beckman, and J. A. Duffie. 1990. "Diffuse Fraction Correlations." *Solar Energy* 45 (1): 1–7.
- Rüdiger, D. 2020. "Radi-Cal." ongoing PhD Thesis, unpublished yet, AEE INTEC, Graz University of Technology, funded by FFG Forschungspartnerschaften – industriennahe Dissertationen.
- Tanabe, Shin Ichi, Chie Narita, Yoshiichi Ozeki, and Masaaki Konishi. 2000. "Effective Radiation Area of Human Body Calculated by a Numerical Simulation." *Energy and Buildings* 32 (2): 205–15.
- Toudert, Fazia Ali. 2005. "Dependence of Outdoor Thermal Comfort on Street Design in Hot and Dry Climate." *Building and Environment*, no. 15.
- VDI. 1994. "VDI 3789 Blatt 2." *Umweltmeteorologie - Wechselwirkungen Zwischen Atmosphäre Und Oberflächen - Berechnung Der Kurz- Und Der Langwelligen Strahlung*.
- Watanabe, Shinichi. 2009. "Measurement of Solar Radiation Absorptance of Different Clothing Fabric for Outdoor Thermal Comfort Study." *Japanese Journal of Biometeorology* 45 (4): 121–29.
- WHO, World Health Organisation. 2004. "Heat-Waves: Risks and Responses." *Health and Global Environmental Health Series No.2* (2): 124 pp.
- Zhang, H., T. L. Hu, and J. Ch Zhang. 2009. "Surface Emissivity of Fabric in the 8-14 μ m Waveband." *Journal of the Textile Institute* 100 (1): 90–94.

IMPULSE AUS DER GEBÄUDE- UND ANLAGENSIMULATION FÜR DIE BETRIEBSFÜHRUNG EINES KRAFT-WÄRME-KÄLTE-VERBUNDES

K. Walther¹ und K. Voss¹

¹Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal, Deutschland

KURZFASSUNG

Die vorliegende Studie zeigt das Zusammenwirken von Simulation und Monitoring anhand eines Gebäudeensembles mit Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung im industriellen Maßstab.

Die Gebäudesimulation umfasst ein Modell in IDA ICE unter Berücksichtigung der Logistik- und Produktionsprozesse innerhalb der Gebäude. Das hydraulische System mit der Betriebsführung und Regelung der Erzeuger wird in einer Anlagensimulation abgebildet.

Ein Fokus liegt auf einer systematischen Form der Beschreibung der Betriebsführungsstrategie der Wärme- und Kälteerzeugung, die der regelungstechnischen Komplexität eines Kraft-Wärme-Kälte-Verbundes gerecht wird. Anhand der Wärmeversorgung wird beispielhaft dargestellt, wie Erkenntnisse aus Gebäudesimulationen in eine Betriebsführungsstrategie umgesetzt und in der Anlagensimulation geprüft werden.

ABSTRACT

This study shows the interaction of simulation and monitoring on the basis of a building ensemble with combined heat, power and cooling on an industrial scale.

The building simulation in IDA ICE includes a model taking into account the running logistics and production processes. The hydraulic system with the operational management and control of the producers is represented in a plant simulation.

One focus is on a systematic way of describing the operation management strategy of the heating and cooling generation, which takes into account the complexity of a combined heat, power and cooling system. Using the heat supply as an example, it is shown how findings from building simulations are implemented in an operation management strategy and tested in the plant simulation.

EINLEITUNG

Vor dem Hintergrund der Anforderungen an Energieeffizienz, die Integration erneuerbarer Energien und die zunehmende Interaktion von Gebäuden mit ihren Versorgungsnetzen ist eine steigende Komplexität gebäudetechnischer Systeme zu verzeichnen. Multivalente Systeme mit unterschiedlichen Temperaturniveaus (z.B. Wärmepumpe vs. BHKW) oder Energieträgern (z.B. Gas vs. Solarthermie) erfordern besondere Sorgfalt in ihrer Planung und Automation. Gebäude mit komplexen technischen Konzepten erreichen im Betrieb vielfach nicht vollumfänglich ihre in der

Planung definierten energetischen Ziele. Dabei lassen sich die Anforderung an den Gebäudebetrieb in drei aufbauenden Stufen formulieren.

1. *Stabilität und Versorgungssicherheit:* Die Erzeuger sind im Regelbetrieb frei von Störungen zu betreiben und erfüllen die Leistungsanforderungen der Verbraucher.
2. *Energieeffizienz, Ökologie und Kosten:* Erzeuger- und Verbrauchersysteme sind entsprechend den Anforderungen des Bauherrn mit optimalen Temperaturniveaus und aufeinander abgestimmten Zeitprofilen eingestellt.
3. *Netzdienlichkeit:* Gebäude erfüllen zukünftig Anforderungen an die Interaktion mit übergeordneten Netzen, vgl. Smart Readiness Indicator (SRI) in der EPBD (Europäische Union 2018).

Die Stufen 2 und 3 sind dabei eng mit Fragen der Wirtschaftlichkeit verknüpft. Im Mittelpunkt der vorliegenden Studie stehen die zur Bewältigung dieser Anforderungen in Planung, Inbetriebnahme und Betrieb eingesetzten Methoden und Werkzeuge.

Am Beispiel einer Anlage mit Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) im industriellen Maßstab wird das strukturierte Zusammenwirken von Gebäude- und Anlagensimulation als Planungsinstrumente mit anschließendem Betriebsmonitoring und digitalen Prüfmethode zur Unterstützung einer geordneten Inbetriebnahme dargestellt.

Entwickelte Strategien zur Betriebsführung basieren u.a. auf dem Einsatz neuentwickelter, wärmemengenzählender Pumpen in Verbraucherkreisen. Diese zusätzliche Funktion ist für Nassläuferpumpen bereits verfügbar und kann in Zukunft einen relevanten Beitrag für intelligente Betriebsführungsstrategien in multivalenten Systemen liefern.

AUSGANGSLAGE

Simulationen sind etabliertes unterstützendes Werkzeug in allen Lebenszyklusphasen von Gebäuden. Dabei wird insbesondere in Planungsphasen erhebliches Detailwissen erarbeitet. Da Gebäude im Betrieb vielfach ihre in der Planung definierten Ziele nicht erreichen (performance gap), rückt die Überprüfung von Betriebszuständen der technischen Komponenten zunehmend in den Fokus von Wissenschaft und Praxis. Grundlage für einen nachvollziehbaren und prüfbareren Gebäudebetrieb ist eine eindeutige und systematische Beschreibung der Gebäudeautomation.

Abbildung 1 skizziert, wie Gebäude-, Anlagensimulation und Monitoring so ineinandergreifen, dass die Anforderungen an stabilen, optimierten und netzdienlichen Betrieb erreicht und überprüft werden können.

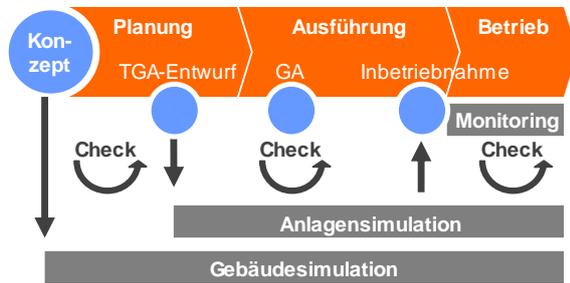


Abbildung 1: Impulse aus Gebäude- und Anlagensimulationen im Lebenszyklus

Gebäudesimulation

Simulationen zur Ermittlung von Lastprofilen sind bei komplexen Gebäuden neben Komfortsimulationen zur Regel in den Vorentwurfs- und Entwurfsphasen geworden. Sie dienen in erster Linie der Beratung von Bauherren und Architekten zur Optimierung von Geometrie, Bauphysik, Nutzung etc. und idealerweise als Grundlage des TGA-Entwurfs.

Aus Lastprofilen lassen sich bereits ohne Anlagensimulation eine Vielzahl von Hinweisen für den stabilen und energieeffizienten Betrieb, die Dimensionierung von Erzeugern sowie deren Aufteilung auf Grundlast und Spitzenlast und passende Temperaturniveaus ableiten. Erkenntnisse aus Gebäudesimulationen werden aktuell noch selten in Anleitungen zur Betriebsführung für Nutzer und Betreiber von Gebäuden aufbereitet. Dadurch bleiben wesentliche Arbeitsergebnisse und Erkenntnisse vielfach ungenutzt.

Anlagensimulation

Im Gegensatz zur thermischen Gebäudesimulation ist die Simulation von Anlagen zur Wärme- und Kälteversorgung über Forschungsvorhaben hinaus in der Planungspraxis weniger verbreitet. Gründe dafür sind fehlende Verpflichtungen, zusätzlicher Aufwand für den Bauherrn und erforderliches Expertenwissen bei der Bedienung der Software.

Planungsbegleitende Anlagensimulationen sind in hohem Maße von den verfügbaren Angaben der technischen Komponenten abhängig. Aus diesem Grund können sie sinnvoll erst zur Begleitung der TGA-Entwurfsplanung erstellt werden. Angaben wie detaillierte Erzeugerkennlinien liegen in der Regel herstellerseitig nicht vor und können erst durch Messungen im Betrieb ermittelt werden.

Ziel einer Anlagensimulation sind auch Vorgaben für die Automation der Anlagenkomponenten und Kontrolle von Planung und Ausführung.

Gebäudeautomation und digitale Prüfung

Die Ausführung der Gebäudeautomation und Inbetriebnahme von HVAC-Systemen basieren in der

Regel auf textlichen Regelungsbeschreibungen als Planungsleistung. Normative Grundlage für die Darstellung von Regelungsaufgaben in der Gebäudeautomation ist VDI 3814-6 (VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2008). Bereits darin wird einleitend festgestellt, dass „die bisher häufig verwendete textliche Beschreibung schon bei einfachen Aufgabenstellungen schnell an ihre Grenzen“ stößt. Dennoch ist die textliche Funktionsbeschreibung die Regel in Planung und Ausführung. Eine ausführliche Darstellung der Sachverhalte enthält (Plesser 2013).

Ebd. wurde ausgehend vom Zustandsgraphen nach VDI 3814-6 eine als „Aktive Funktionsbeschreibung“ bezeichnete Methodik zur strukturierten, systematischen Beschreibung von Regelungsaufgaben vorgestellt. Diese Methodik wird nachfolgend für Erzeugersysteme angewandt, gilt aber für Verbraucher gleichermaßen.

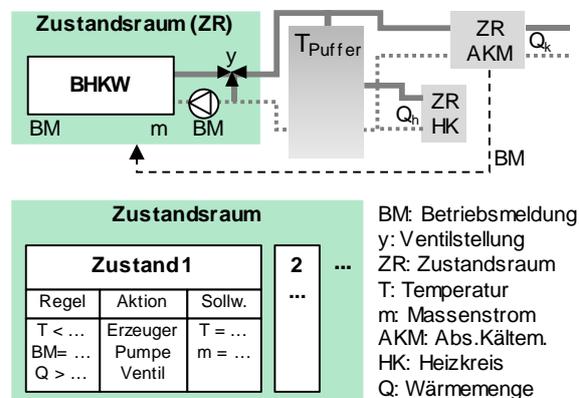


Abbildung 2: Zustandsräume und Zustände in Anlehnung an VDI 3814-6 und (Plesser 2013)

Zunächst sind die Komponenten eines Versorgungsschemas in Zustandsräume (ZR) aufzuteilen. Prinzipiell kann ein gesamtes Versorgungssystem aus Erzeugern und Verbrauchern inkl. Speichern, Pumpen und Ventilen als ein Zustandsraum betrachtet werden. Mit steigender Anzahl zu berücksichtigter Komponenten nehmen allerdings die möglichen Zustandskombinationen exponentiell zu. In (Rehbein et al. 2014) wurde eine Systematik zum Zerlegen von Energieversorgungssystemen und RLT-Anlagen vorgestellt. Danach sollte ein Zustandsraum einzelne Erzeuger und deren Peripherie aus Pumpen und Ventilen umfassen. In Abbildung 2 bilden BHKW, Pumpe und Mischventil einen Zustandsraum.

Ein Zustandsraum umfasst die Gesamtheit aller Betriebszustände, die ein System annehmen kann. Bei Erzeugern sind dies in der Regel die Zustände „An“ und „Aus“. Weitere Zustände sind nur dann erforderlich, wenn mit ihnen abweichende Betriebsregeln, Aktionen und Sollwerte verbunden sind.

Betriebsregeln (BR) bestimmen, ob ein Betriebszustand eintritt. Für Erzeuger erfolgt dies in der Regel auf Basis von Pufferspeichertemperaturen oder Betriebsmeldungen anderer Komponenten.

Aktionen definieren das Verhalten von Erzeugern, Pumpen, Ventilen und Reglern. Sollwerte stellen pro Betriebszustand einzuhaltende physikalische Größen (Temperaturen, Durchflüsse etc.) dar. Eine nach diesem Muster strukturierte Funktionsbeschreibung (Soll-Werte) ist mit Daten aus der Gebäudeautomation (Ist-Werte) im Betrieb unmittelbar prüfbar.

Bei Abhängigkeiten von Zustandsräumen untereinander (vgl. Abbildung 2: AKM fordert BHKW via Betriebsmeldung an), ergeben sich z.T. komplexe Wechselwirkungen. Bei Differenzierung möglicher Lastfälle lässt sich mit einer strukturierten Beschreibung noch ein geordneter Anlagenbetrieb beschreiben, ohne allerdings die dynamische Abfolge von Betriebszuständen sowie deren Dauer (Relevanz) bewerten zu können. Planungsbegleitende Gebäude- und/oder Anlagensimulationen schließen diese Wissenslücke und können als Nachweis der Funktionsfähigkeit einer Betriebsführungsstrategie dienen.

Als weitere grafische Darstellungsform bieten Programmablaufpläne (Beispiel vgl. (Klein et al. 2014)) den Vorteil, dass die Abfolge von Zuständen und deren Übergangsbedingungen leicht nachvollziehbar sind. Allerdings ist die Erstellung bei komplexen Systemen aufwändig, die Abbildungen werden in Abhängigkeit der berücksichtigten Komponenten sehr umfangreich und müssen im Zuge der Programmierung wieder „zurückübersetzt“ werden.

Strukturierte Beschreibungen werden in der Gebäudeautomation nicht flächendeckend umgesetzt, was auf Sparsamkeit, Zeit- und Kompetenzprobleme zurückzuführen ist (Fisch et al. 2017).

Betriebsführung und KWKK

Im Betrieb von Gebäuden und technischen Anlagen sind Betreiber nach einer Übergabe und Einweisung in der Regel darauf angewiesen, Zusammenhänge neu zu verstehen. Ein „Gebäudehandbuch“, in dem Betriebszustände dargestellt werden und das Erkenntnisse z.B. aus den Gebäudesimulationen enthält liegt in der Regel nicht vor.

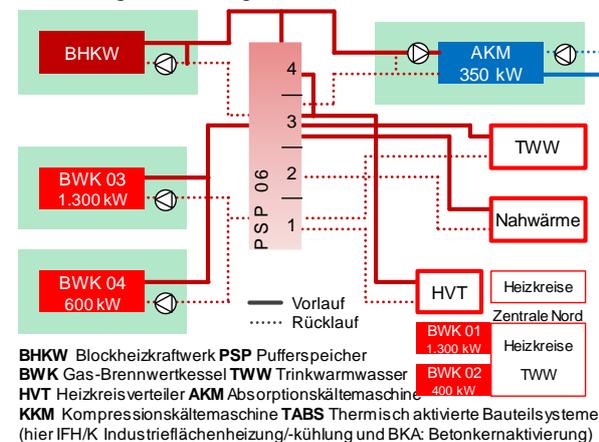


Abbildung 3: Vereinfachtes Schema der Wärme- und Kälteerzeugung

Betriebsregeln für Erzeuger basieren üblicherweise auf Speichertemperaturen (Abbildung 2: T_Puffer). Bei Kombination mehrerer Erzeuger unterschiedlicher Leistung wird in textlichen Funktionsbeschreibungen häufig eine Erzeugersequenz bei steigender Verbraucherlast angegeben. Eine unmittelbare Kopplung zwischen Verbraucherlast und Erzeugerleistung liegt also nicht vor und ist bei Standard-Schaltungen mit ausreichenden Wärmespeichern auch nicht erforderlich. Da Gebäude außerhalb von Forschungsprojekten vielfach nicht über Wärmemengenzähler verfügen, ist eine Abstimmung von Last und Erzeugerleistung unüblich. Speziell Kraft-Wärme-Kälte-Verbünde müssen nicht selten in den Jahren nach Inbetriebnahme kontinuierlich angepasst werden, was bei Misserfolg in der Stilllegung ganzer Anlagen enden kann. Gründe dafür sind in der Regel Konflikte der Temperaturniveaus bei nicht aufeinander abgestimmten Kombinationen von BHKW und AKM. Dokumentierte funktionierende Projekte finden sich z.B. in (Wuschig 2015) oder (Klein et al. 2017).

DEMONSTRATIONSOBJEKT

Grundlage für die vorliegende Studie sind Arbeiten im Rahmen des Projektes VEProB – Vernetzte Energieströme von Produktions- und Bürogebäuden. Demonstrationsobjekt ist der Campus eines Industrieunternehmens, auf dem aktuell ein Produktions- und ein Verwaltungsgebäude und zukünftig Erweiterungsbauwerke entstehen. Die Wärme und Kälteerzeugung erfolgt zentral im Produktionsgebäude, alle weiteren Liegenschaften inkl. Verwaltungsgebäude sind über ein Nahwärme- und -kältenetz angeschlossen. Die Arbeiten in VEProB beschränken sich auf die Interaktion von Produktions- und Verwaltungsgebäude.

Im Mittelpunkt der Anlagen steht ein Kraft-Wärme-Kälte-Verbund mit BHKW (504 kW_{th}, 405 kW_{el}) und Absorptionskältemaschine (AKM, 348 kW). Abbildung 3 zeigt ein vereinfachtes Schema der Wärme- und Kälteversorgung.

Das BHKW kann in den Pufferspeicher zur Wärmeversorgung einspeisen oder die AKM bedienen. Eine definierte Aufteilung von Volumenströmen ist nicht vorgesehen. Gasbrennwertkessel unterschiedlicher Leistung (400 – 1.300 kW) dienen als Spitzenlasterzeuger.

Die AKM speist entweder in einen Sprinklertank, der in die Versorgung der Industrieflächenkühlung und Betonkerntemperierung eingebunden ist, oder in den Kälteverteiler, ein. 3 Kompressionskältemaschinen unterschiedlicher Leistung (750 – 1.300 kW) dienen als Spitzenlasterzeuger.

Neben dem BHKW als schaltbarem Wärmeerzeuger ist auf dem Dach des Produktionsgebäudes eine 1 MW_p PV-Anlage installiert. Darüber hinaus erfolgt die Auskopplung von Abwärme aus Fertigungsprozessen, die aber unmittelbar an Verbrauchern eingespeist wird.

Die Untersuchungen in dieser Studie bauen auf einer abgeschlossenen TGA-Planung auf und bilden den Status zum Ende von Planungs- und Bauphase ab. Abgleich und Kalibrierung der Simulationsmodelle erfolgen sobald Messwerte vorliegen. Das Produktions- und Verwaltungsgebäude werden im Laufe des Jahres 2020 vollständig in Betrieb genommen.

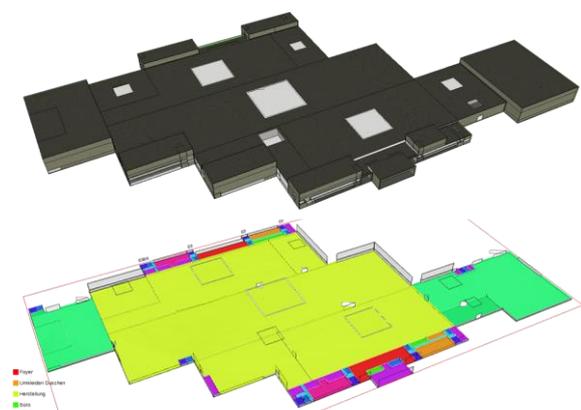


Abbildung 4: Simulationsmodell (oben) und Zonierung (unten) in IDA ICE (Produktionsgebäude)

Gebäudesimulation

Das Demonstrationsobjekt verfügt über ein hoch aufgelöstes Mess- und Zählkonzept mit ca. 140 Wärmemengenzählern und ca. 240 Stromzählern. Als Referenz für Energie- und Emissionsbilanzierung sowie Studien zur Gebäude-Stromnetz-Interaktion und Raumklimaanalysen dient ein Simulationsmodell in IDA ICE.

Die Modellierung berücksichtigt neben Randbedingungen aus Standort, Geometrie und

Bauphysik, Einflüsse aus Produktionsprozessen (Abwärme) sowie Logistik (Toröffnungen) und bildet unterschiedliche Raumsysteme zur Beheizung und Kühlung, insbesondere Industrieflächenkühlung, und 22 mechanische Lüftungsanlagen ab. Das Modell umfasst rund 60 Zonen, um der räumlichen Auflösung der Wärmemengenzähler zu entsprechen.

Die Gebäudesimulation dient zunächst zur Ermittlung von Lastprofilen, die Eingangsgröße für die Anlagensimulation sind. Eine Kopplung von Gebäude- und Anlagensimulation bzw. Messwerten ist möglich.

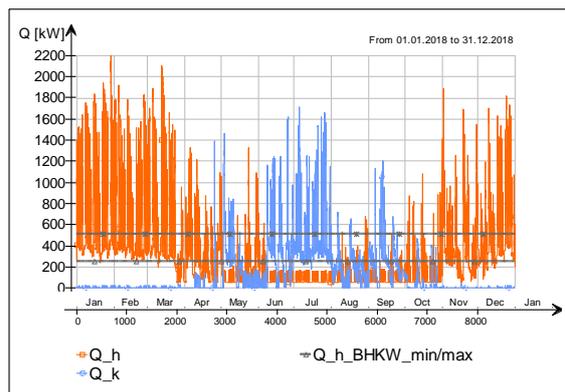


Abbildung 5: Jahresprofil Wärme und Kälte

Jahresprofil und Dauerlinie des Wärme- bzw. Kältebedarfes weisen darauf hin, dass Lasten im Teillastbereich des BHKW und in insbesondere in der Übergangszeit unterhalb der Mindestleistung zu erwarten sind. Die Lastprofile stellen jedoch, solange keine Messwerte vorliegen, nur eine qualifizierte Annahme dar, da sie erheblich durch die Auslastung der Produktion, Schichtarbeitsprofile und Laufzeiten von Lüftungsanlagen beeinflusst werden. Erweiterungsbauwerke über Produktions- und Verwaltungsgebäude hinaus sind ebenfalls noch nicht enthalten.

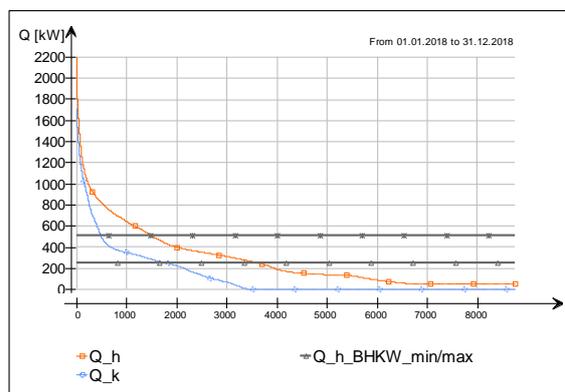


Abbildung 6: Jahresdauerlinie Wärme und Kälte

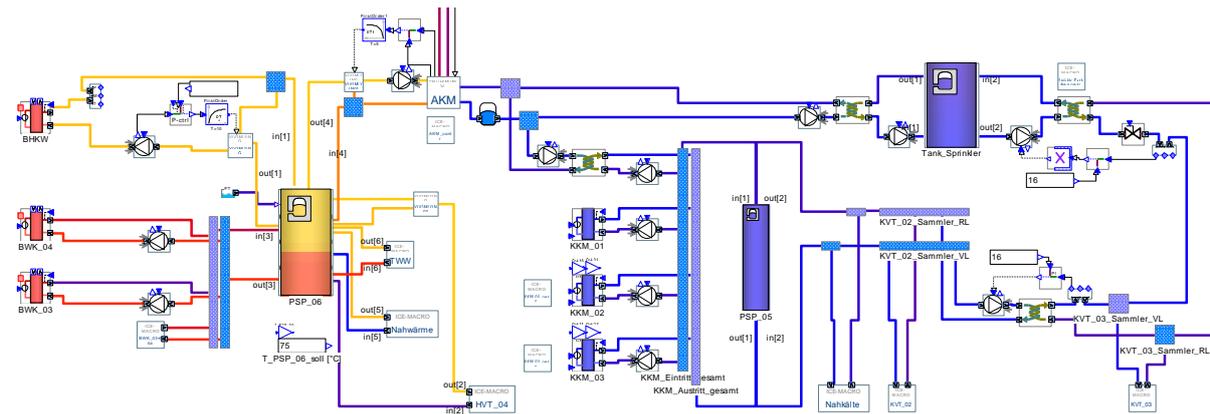


Abbildung 7: Anlagensimulation in IDA ICE

Analyse

Vor der Erstellung von Betriebsführungsstrategien sollten übergeordnete, zu berücksichtigende Grundsätze formuliert werden. Dazu zählen im Falle von Kraft-Wärme-Kälte-Verbänden allgemein:

- Maximierung der Laufzeit des BHKW und Vermeidung von häufigen Schaltvorgängen
- BHKW zur Wärmeversorgung in der Regel wirtschaftlicher als zur Kälteversorgung über AKM
- Berücksichtigen der Ankopplung des BHKW an das übergeordnete Stromnetz (Einspeisung und Eigenverbrauch)
- Zusammenhängende Laufzeiten der AKM im Grundlastbetrieb.

Aus den in Abbildung 3 dargestellten Zusammenhängen und der durchgeführten Gebäudesimulation lassen sich für das Demonstrationsobjekt ergänzend hinzufügen:

- Die Strategie der Wärmeversorgung muss Teillastbetrieb des BHKW berücksichtigen.
- Beladung des Sprinklerbehälters durch die AKM und Entladung müssen sowohl seinen Ladezustand als auch aktuellen bzw. zukünftigen Kältebedarf am TABS-Verteiler berücksichtigen.
- Minimierung von Speicherverlusten, d.h. Verbrauch von gespeicherter Energie prioritär gegenüber erneuter Einspeicherung.

Anlagensimulation

Zur Bewertung unterschiedlicher Betriebsführungsstrategien dient ein Modell des hydraulischen Systems in IDA ICE (vgl. Abbildung 7), das die in Abbildung 3 dargestellten Komponenten umfasst. Die Lastprofile sind aus der Gebäudesimulation übernommen.

Die Anlagensimulation basiert auf einer Reihe von Annahmen und Idealisierungen wie zum Beispiel:

- Alle Sensoren sind in einer umfassenden Automation verfügbar. In Realität existieren üblicherweise neben der Sensorik der übergeordneten Gebäudeautomation (z.B.

Temperatursensoren im Pufferspeicher) Fühler, die unmittelbar Erzeugern z.B. zur Überwachung von Betriebsgrenzen (Temperaturen, Durchflüsse) zugeordnet sind. Gebäudeautomation und interne Anlagenregelungen können dabei über unterschiedliche Sensoren mit unterschiedlichen Genauigkeiten verfügen.

- Dies erfordert in der Simulation eine robuste Regelung mit ausreichenden Temperaturbändern zur Berücksichtigung von Toleranzen.
- Da weder Kennlinien der Erzeuger noch Messwerte vorliegen, fließen erzeugerspezifische Kennlinien von Leistungs- und/oder Temperaturverläufen aktuell noch nicht in die Simulation ein.
- Das dynamische Verhalten von Erzeugern kann detailliert erst durch Messungen berücksichtigt werden.

Die nachfolgend untersuchten Betriebsführungsstrategien konzentrieren sich zunächst auf das Subsystem der Wärmeversorgung mit BHKW und Kessel an den Pufferspeicher.

Dazu wird eine typische Strategie aus der Planungspraxis in der Anlagensimulation für einen beispielhaften Wintertag untersucht und einer optimierten und strukturiert beschriebenen Betriebsweise gegenübergestellt.

BETRIEBSFÜHRUNG STANDARD

Als üblicher Systemvorschlag wird eine Erzeugersequenz bei steigender Verbraucherlast wie folgt angenommen:

1. BHKW (Grundlast)
2. BHKW + Kessel klein
3. BHKW + Kessel groß
4. BHKW + Kessel klein + Kessel groß

Zielgröße ist eine Solltemperatur im Pufferspeicher von 75 °C. Erkenntnisse aus einer Gebäudesimulation zum Lastprofil werden bewusst ausgeklammert.

Betriebsverhalten Simulation

Abbildung 8 zeigt das Profil von Wärmelast und Erzeugerleistungen für einen beispielhaften Wintertag. Dabei wird Takten als typisches Problem im BHKW-Betrieb deutlich. Auslöser ist die Abschaltung bei Überschreitung der maximalen BHKW-Eintrittstemperatur (83 °C). Begünstigt wird dies durch eine Soll-Austrittstemperatur des BHKW (98 °C), die im Heizfall deutlich höher ist, als das erforderliche Temperaturniveau im Pufferspeicher (75 °C), vgl. Abbildung 9.

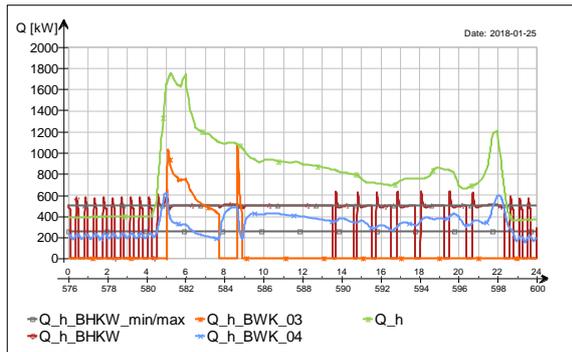


Abbildung 8: Betriebsführung Standard, Leistungsprofil Erzeuger

Darüber hinaus wirkt sich der Kesselbetrieb in den Tagesrandbereichen negativ auf das Teillastverhalten des BHKW aus; auch hier kommt es zum Takten.

Das Betriebsverhalten ließe sich durch optimierte Wahl von Parametern (z.B. Absenkung der Soll-Austrittstemperatur aus dem BHKW) verbessern, ohne grundlegend eine optimale Aufteilung von Erzeugern auf die Last zu erlauben.

Tabelle 1: Zustandsräume, Zustände, Regeln, Aktionen und Sollwerte (BM = Betriebsmeldung, Q_h: Heizlast, Q_k: Kühllast, SOC: State of Charge, Ladezustand)

ZUSTANDSRÄUME	BETRIEBSZUSTÄNDE	BETRIEBSREGELN	AKTIONEN	SOLLWERTE
BWK klein	Aus	$Q_h > Q_{h_BHKW_min}$ UND $Q_h < Q_{h_BHKW_max}$	Erzeuger: Aus Pumpe: Aus	BM = Aus $m = 0 \text{ kg/s}$
BWK groß (analog)	An	$Q_h < Q_{h_BHKW_min}$ ODER $Q_h > Q_{h_BHKW_max}$	Erzeuger: An Regler: T_{out} so, dass $T_{Puffer_h3} = 75 \text{ °C}$ Pumpe: An	BM = An $T_{Puffer_h3} = 75 \text{ °C}$ $m = m_{nenn} \text{ (kg/s)}$
BHKW	Aus	$Q_h < Q_{h_BHKW_min}$ ODER $T_{BHKW_in} > 83 \text{ °C}$	Erzeuger: Aus Pumpen: Aus	BM = Aus $m = 0 \text{ kg/s}$
	BHKW_Wärme	$Q_h > Q_{h_BHKW_min}$	Erzeuger: An Pumpe: An	BM = An $T_{out} = 90 \text{ °C}$ $m = m_{nenn} \text{ (kg/s)}$
	BHKW_Kälte	Noch festzulegen	Erzeuger: An Pumpe: An	BM = An $T_{out} = 98 \text{ °C}$ $m = m_{nenn} \text{ (kg/s)}$
weitere				
AKM Sprinkler Entladung KKM		SOC_Sprinkler Q_k_TABS / Zukunft Zukünftig: Netzsignal		

Das Ergebnis verdeutlicht, dass bei vereinfachten Regelstrategien in Verbindung mit pessimistischen Kriterien (z.B. maximale BHKW-Eintrittstemperatur) gerade in Teillastzuständen die Anforderungen an stabilen Betrieb ggfs. nicht erfüllt werden.

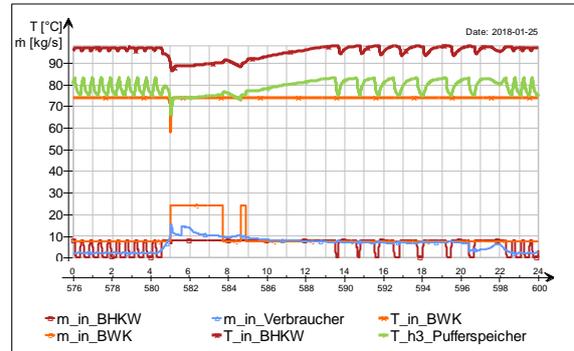


Abbildung 9: Betriebsführung Standard, Temperatur und Durchfluss im Pufferspeicher

BETRIEBSFÜHRUNG OPTIMIERT

Wie eingangs formuliert, erfordern komplexe Versorgungssysteme eine systematisch strukturierte Betriebsführungsstrategie unter Einbeziehung begleitender Simulationen. Dementsprechend wird nachfolgend aufbauend auf den Erkenntnissen der Gebäudesimulation zunächst eine an der Methodik der Aktiven Funktionsbeschreibungen orientierte Betriebsführungsstrategie entwickelt und anschließend in der Anlagensimulation überprüft.

Zustandsräume

In Anlehnung an die in (Rehbein et al. 2014) genannten Prinzipien wird eine Aufteilung in Zustandsräume und Zustände nach Tabelle 1 vorgenommen (vgl. auch Abbildung 3).

Betriebszustände

Für jeden Zustandsraum erfolgt eine Festlegung von Betriebszuständen. In der Regel sind dies die Zustände „An“ und „Aus“. Für das BHKW werden neben „Aus“ die Zustände „Wärme“ und „Kälte“ definiert, da hier unterschiedliche Austrittstemperaturen vorgesehen sind (vgl. folgender Abschnitt „Aktionen und Sollwerte“).

Betriebsregeln

Die Definition der Betriebsregeln muss nun, aufbauend auf den Erkenntnissen der Gebäudesimulation und unter Einbeziehung einer begleitenden Anlagensimulation so erfolgen, dass zunächst ein stabiler und energieeffizienter Betrieb erreicht wird.

Da das Demonstrationsobjekt mit Wärmemengenzählern an relevanten Abgängen und Erzeugern ausgestattet ist, lassen sich deren Informationen in die Betriebsführungsstrategie einbinden. Insbesondere in multivalenten Systemen lassen sich so in Abhängigkeit der Gebäudelast gezielt Erzeuger sperren oder freigeben, was die Sequenzierung vereinfacht. Dabei ist zu beachten, dass ein sinnvoller Integrationszeitraum zu wählen ist. Dieser Aspekt ist im Rahmen des Monitorings weiter zu untersuchen.

Im Gegensatz zum statischen Ansatz werden die Betriebsregeln und Aktionen wie folgt gewählt (vgl. Tabelle 1):

- Freigabe des BHKW erst ab Verbraucherleistungen oberhalb der BHKW-Mindestleistung zur Vermeidung von Taktbetrieb
- Sperrung der Brennkessel zwischen BHKW-Mindest- und Maximalleistung
- Freigabe der Brennkessel unterhalb der BHKW-Mindestleistung und oberhalb der BHKW-Maximalleistung, um Einflüsse der Kessel auf den BHKW-Teillastbetrieb zu vermeiden.

Aktionen und Sollwerte

Aktionen und Sollwerte umfassen die in Tabelle 1 dargestellten Aktoren und Variablen. Aus den Erkenntnissen der begleitenden Anlagensimulation werden folgende Sollwerte festgelegt:

- Variable Austrittstemperaturen des BHKW: Im Heizfall geringe Austrittstemperatur, damit der Pufferspeicher im Teillastbetrieb nicht die maximale BHKW-Eintrittstemperatur erreicht und im Kühlfall maximale Austrittstemperatur zur Versorgung des Absorbers.
- Ausregelung der Temperatur im Pufferspeicher über Brennkessel mit variabler Austrittstemperatur.

Betriebsverhalten Simulation

Abbildung 10 zeigt die Aufteilung von Erzeugerleistungen im optimierten Ansatz. Es zeigt sich, dass das Takten des BHKW vermieden und eine

sinnvolle Aufteilung der Erzeuger auf Verbraucherleistungen erreicht wird.

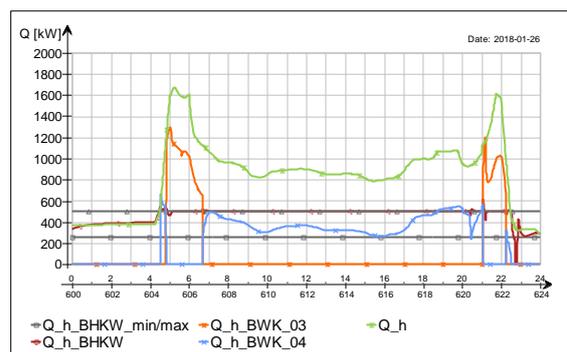


Abbildung 10: optimierter Ansatz: Aufteilung Wärmeleistung BHKW und BWK

Abbildung 11 verdeutlicht die Vorteile des entworfenen Konzeptes anhand der Temperaturen im Pufferspeicher. Maßgeblich ist die Temperatur des Sensors T_{h3} im Pufferspeicher (Kammer 3, vgl. Abbildung 3). Dieser muss mindestens auf dem zur Wärmeversorgung erforderlichen Temperaturniveau liegen und darf gleichzeitig 83 °C nicht überschreiten, da auf diesem Niveau das BHKW versorgt wird. Beide Bedingungen werden erfüllt. Der Verlauf von „ T_{in_BWK} “ zeigt die variable Austrittstemperatur der Brennkessel mit dem Ziel eine Temperatur von 75 °C in Kammer 3 zu erreichen.

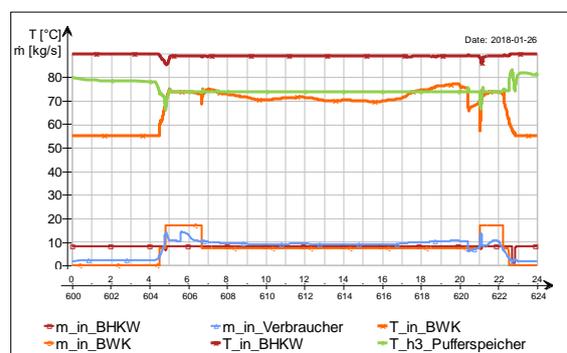


Abbildung 11: optimierter Ansatz: Temperaturen und Durchflüsse im Pufferspeicher Wärme

ZUSAMMENFASSUNG

Am Beispiel der Wärmeversorgung konnte in der Simulation nachgewiesen werden, dass durch Zusammenwirken von Gebäudesimulation, Anlagensimulation und strukturierter Funktionsbeschreibung ein stabiler und energieeffizienter Anlagenbetrieb zu erreichen ist. Demgegenüber ist bei pessimistischen d.h. strengen Annahmen, wie festen Temperaturgrenzen, instabiler Anlagenbetrieb nicht auszuschließen.

In der Diskussion mit Planern und Errichtern wird darauf hingewiesen, dass z.B. BHKWs in der Praxis nach einem entsprechenden Einregulierungsprozess robuster reagieren und größere Temperaturbänder der Eintrittstemperatur abdecken können. So verfügt das

BHKW über interne Regelungen (z.B. kurzfristige Veränderung von Volumenströmen und Austrittstemperaturen), die ein unmittelbares Abschalten bei Überschreiten einer Eintrittstemperatur verhindern. Dieses detaillierte Anlagenverhalten lässt sich mit Standardkomponenten in der Anlagensimulation kaum verlässlich vorhersagen und erfordert einen Abgleich mit Messdaten unter Einbeziehung von Messgenauigkeiten, Regelstrecken etc., was Gegenstand weiterer Untersuchungen sein wird.

Darüber hinaus sind die tatsächlichen Lastprofile, die im Falle von Produktionsstätten deutlich schwieriger vorherzusagen sind als z.B. in Verwaltungsbauten, von erheblicher Bedeutung.

AUSBLICK

Im Mittelpunkt des Forschungsvorhabens steht die Energie- und Emissionsbilanzierung der gesamten Liegenschaft, die Gegenstand der beginnenden Monitoringphase ist. Die Betriebsführung muss dazu zunächst einen stabilen und nachvollziehbaren und anschließend effizienten Anlagenbetrieb erreichen.

Das Simulationsmodell beinhaltet Vereinfachungen bei der Modellbildung von Komponenten und Reglern, die dem Wissensstand aus Planung und Ausführung geschuldet und durch Messwerte zu vervollständigen sind. Dazu werden im Rahmen der Inbetriebnahme Prüfabläufe zur Bewertung des Kraft-Wärme-Kälte-Verbundes durchgeführt.

Die Beschreibung in Zustandsräumen für technische Anlagen ist in der Forschung etabliert, findet aber in der Planungspraxis, z.B. in Funktionsbeschreibungen, kaum Anwendung. Die vorgestellte Methodik soll daher exemplarisch auf das gesamte Erzeugersystem und komplexe Verbraucher erweitert werden, um die Chancen eines systematischen Zusammenwirkens von Simulation und Monitoring zur Definition und Überprüfung von Zielwerten aufzuzeigen. Dazu gehört auch eine intelligente Strategie zur Beladung des Sprinklertanks nach folgenden Prinzipien:

- Beladung nur, wenn zukünftig Kältebedarf am TABS-Verteiler zu erwarten ist.
- Vorrang der Entladung des Sprinklertanks vor Beladung.

Die Bereitstellung von Flexibilitätsoptionen stellt eine zukünftige Anforderung an Gebäude dar, die sich im Demonstrationsobjekt auf unterschiedlichen Ebenen untersuchen lässt: Zum einen bietet das Nahwärme- und Kältenetz die Möglichkeit campusinterner Wärme-Flexibilitätsoptionen. Zum anderen stellt das BHKW als schaltbarer Wärmeerzeuger eine Verbindung zum übergeordneten Stromnetz dar. Bei der Analyse dient die aufgebaute Simulationsumgebung als Referenz.

Die im Rahmen des Forschungsprojektes gewonnenen Erkenntnisse sollen Anwendung auf die Erweiterungsbauwerke auf dem Campus finden.

DANKSAGUNG

Das diesem Beitrag zu Grunde liegende Vorhaben „VEProB – Vernetzte Energieströme von Produktions- und Bürogebäuden“ wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 03ET1446B gefördert. Die Autoren danken dem Mittelgeber für die Unterstützung und dem Projektträger Jülich (PtJ) für die Betreuung des Vorhabens.

LITERATUR

Europäische Union (2018): Directive (EU) 2018/ of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency. EPBD (156), zuletzt geprüft am 18.09.2019.

Fisch, Norbert; Plesser, Stefan; Wussler, Maik; Sauss, David 2017: Spec&Check Gebäudeautomation. Entwicklung und Erprobung einer Methodik zur Beschreibung, Abnahme und Überwachung von Funktionen der Gebäudeautomation. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (Forschungsinitiative Zukunft Bau, F 3043).

Klein, K.; Gschwander, S. et al. 2017: Latentwärmespeicher in netzreaktiven Gebäuden. LaNeGe. Abschlussbericht. Freiburg.

Klein, K.; Wahl, A. et al. 2014: Optimierter Betrieb von KWKK-Systemen mit Speichern - Case Study am Beispiel einer Liegenschaft. In: van Treeck, C. und Müller, D. (Hg.): BauSIM 2014. Human-centred building(s). Proceedings of the 5th German-Austrian IBPSA Conference. Aachen, 22.-24. September. RWTH Aachen University, S. 402–409.

Plesser, S. 2013: Aktive Funktionsbeschreibungen zur Planung und Überwachung des Betriebs von Gebäuden und Anlagen. Dissertation. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig. IGS – Institut für Gebäude- und Solartechnik.

Rehbein, C.; Plesser, S.; Fisch, N. 2014: Application of Active Funktional Specifications for HVAC Systems. In: van Treeck, C. und Müller, D. (Hg.): BauSIM 2014. Human-centred building(s). Proceedings of the 5th German-Austrian IBPSA Conference. Aachen, 22.-24. September. RWTH Aachen University, S. 497–502.

VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.: VDI 3814-6 Gebäudeautomation (GA) Grafische Darstellung von Steuerungsaufgaben, Juli 2008.

Wuschig, C. 2015: Energetisch und wirtschaftlich optimierte Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung. Abschlussbericht. ZAE Bayern Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V.

LIKE-Q: ABSCHÄTZUNG DER CO₂-EMISSIONEN EINES NEUBAUQUARTIERS IN DER RAHMENPLANUNG

H. Roggenkamp¹, O. Rosebrock¹ und T. Wilken¹

¹Steinbeis-Innovationszentrum energie+, Braunschweig, Deutschland

KURZFASSUNG

Das in diesem Paper vorgestellte Berechnungstool LIKE-Q stellt eine effiziente Methode dar, die CO₂-Emissionen verschiedener Energieversorgungskonzepte eines Neubauquartiers vom städtebaulichen Wettbewerb bis hin zum Bebauungsplan zu ermitteln. Durch seine anwenderfreundliche und moderne Nutzeroberfläche empfiehlt es sich etwa für Architekten und Entscheidungsträger in Kommunen, die verschiedene Entwürfe so einfach bewerten können.

Das Programm nutzt skalierbare Bedarfsprofile von Typgebäuden und bilanziert basierend auf der gewählten Energieversorgung und -erzeugung die Energieströme in einzelnen Gebäuden und dem gesamten Quartier in 15-Minuten-Intervallen. LIKE-Q ist bewusst für die frühen Phasen der Quartiersentwicklung konzipiert und ersetzt nicht die detaillierte Einzelplanung von Gebäuden oder zentralen Versorgungsanlagen vor der Umsetzung.

ABSTRACT

The calculation tool LIKE-Q, as presented in this paper, is an efficient method to determine the CO₂ emissions of different energy supply concepts from planning competition phase up to the deployment of the construction development plan. With its modern and intuitive graphical user interface, it is a convenient tool for architects and municipal decision-makers to assess different submissions.

The tool uses scalable demand profiles of different building types and balances energy flows in the individual buildings and the entire district based on the selected energy supply and generation components in 15-minute intervals. LIKE-Q is specifically designed for the early phases of district development and therefore does not replace the detailed individual planning of building or central energy supply systems prior to start of construction.

EINFÜHRUNG

Die direkte und indirekte Energieversorgung privater Haushalte sowie Gebäuden von Gewerbe, Handel und Dienstleistungen war im Jahr 2018 für etwa 30 % der

Treibhausgasemissionen Deutschlands verantwortlich (BMU 2019). Durch möglichst klimaneutrale Neubaugebiete besteht die Möglichkeit, diese Emissionen zu senken, indem die richtigen Weichen gestellt und positive Einflüsse auf Strom- und Wärmeversorgung des gesamten Stadtgebiets durch dezentrale Erzeugungseinheiten in den Neubaugebieten gezielt genutzt werden.

Derzeit fehlt Architekten und kommunalen Entscheidungsträgern jedoch eine Möglichkeit, Energieversorgungskonzepte bereits in der Rahmenplanung schnell und einfach zu bewerten, sodass eventuell nicht der unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten günstigsten Variante der Vorzug gegeben wird, da Wechselwirkungen verschiedener Erzeuger und Speicher nicht ausreichend berücksichtigt werden.

Aus diesem Grund wurde das vorliegende Berechnungstool LIKE-Q entwickelt, was abkürzend für „Leitfaden Integration klimaneutraler Energieversorgung für Quartiere“ steht. Es vereint eine einfache Eingabe mit einer schnellen Bilanzierung und erlaubt den Vergleich verschiedener Maßnahmen in Hinsicht auf die zu erwartenden CO₂-Emissionen des Quartiers. Die ökonomischen Aspekte müssen aufgrund einer Vielzahl nicht physikalischer Einflussfaktoren separat betrachtet werden und werden von LIKE-Q nicht abgebildet.

Das Programm wurde in *Visual Basic for Applications* (VBA) geschrieben und steht somit allen Anwendern von Microsoft Excel zur Verfügung.

Berechnung und Eingabe strukturieren sich in drei Ebenen: Gebäude, Baustein und Quartier. Ein Baustein umfasst dabei mehrere Gebäude, ein Quartier mehrere Bausteine, sodass sich Vernetzungseffekte abbilden lassen. Das Programm arbeitet mit skalierbaren Bedarfsprofilen von typologisierten Wohn- und Nichtwohngebäuden, anhand derer während der Nutzereingabe Auslegungsgrößen für gewählte Komponenten wie Erzeuger und Speicher des Energieversorgungskonzepts auf allen drei Ebenen berechnet werden. Hierdurch wird ohne exakte Kenntnis aller Spezifikationen eine realitätsnahe Abschätzung der zu erwartenden Endenergiebedarfe und personenbezogenen

The screenshot shows the 'WOHNGEBÄUDE' (Residential Building) configuration window in the LIKE-Q software. On the left, a list of four existing buildings is shown, each with edit, copy, and delete icons. On the right, the configuration panel is divided into several sections:

- Flächenangaben:** Grundstücksgröße (928 m²), Gebäudegrundfläche (504 m²), Bruttogeschossfläche (2016 m²), and an option for 'Gewerbliche Erdgeschossnutzung?'.
- Gebäudestandard und Energiebedarf:** Radio buttons for 'EnEV 2016', 'KfW 55' (selected), 'KfW 40', and 'KfW 40+'. A 'BEDARFE' button is present. Below, rounded energy demands are listed: Strom ≈ 25 | Trinkwarmwasser ≈ 15 | Heizwärme ≈ 43.
- Wärmeversorgung:**
 - Heizung:** Radio buttons for 'Wärmenetz' and 'dezentral' (selected). Under 'Erzeuger', checkboxes for 'Heizkessel', 'Stromheizung', 'Wärmepumpe' (checked), and 'BHKW' are shown.
 - Trinkwasser:** Radio buttons for 'wie Heizung' (selected), 'Durchlauferhitzer', and 'benutzerdefiniert'. Under 'Erzeuger', checkboxes for 'Heizkessel', 'Stromheizung', 'Wärmepumpe' (checked), and 'BHKW' are shown.
- Speicher:** Checkboxes for 'Heizwärmespeicher vorhanden' and 'Trinkwasserspeicher vorhanden' (both checked).
- Solarthermische Unterstützung:** Checkboxes for 'Trinkwarmwasserbereitung' and 'auch zur Heizungsunterstützung'.
- Photovoltaik:** Checkboxes for 'Photovoltaik-Module vorhanden' and 'Batterie vorhanden' (both checked).

Abbildung 1: Programmoberfläche zur Eingabe eines Wohngebäudes in LIKE-Q. In der linken Hälfte sind die bereits angelegten Gebäude gelistet, in der rechten Hälfte erfolgt die Definition des Gebäudes. In Untermenüs können hinterlegte Standardwerte verändert werden.

Emissionen ermöglicht. Die benötigten Kennwerte umfassen den Gebäudetyp, die GFZ und die GRZ. Alle weiteren Parameter können mit Hilfe der hinterlegten Standardwerte abgebildet werden.

Eine Einordnung der personenbezogenen CO₂-Emissionen kann über einen städtischen Vergleichswert erfolgen, der in der Stadt Wolfsburg beispielsweise bei 4,5 tCO₂ pro Einwohner liegt. Je nach Besonderheiten des existierenden, städtischen Energieversorgungssystems variiert dieser Wert mitunter stark und kann etwa nach dem in ZR WOB (2020) beschriebenen Vorgehen ermittelt werden.

NUTZEROBERFLÄCHE

Der Fokus des Berechnungsprogramms liegt auf der einfachen und intuitiven Eingabe, weshalb der gesamte Programmablauf ausschließlich in einer eigenen Programmoberfläche stattfindet.

Nach Anlegen eines neuen Projekts führt das Programm mit Hinweisen durch die Eingabe. Zunächst wird der Nutzer zur Eingabe einer Postleitzahl aufgefordert, anhand derer die Klimazone (TRY Zonen des Deutschen Wetterdiensts) des Neubauquartiers ermittelt und somit passende Bedarfsprofile zugeordnet werden.

In der Gebäudeebene definiert der Anwender anschließend die verschiedenen Wohn- und Nichtwohngebäude im Neubauquartier. Hier sind lediglich Angaben zu gebäudespezifischen Parametern wie der Qualität der Gebäudehülle, des Wärmeversorgungssystems sowie der eventuellen

Erzeugung erneuerbarer Energien notwendig, Flächen und Anlagenkennwerte von Erzeugern werden automatisch errechnet und gesetzt. Bei Bedarf können alle in die Berechnung eingehenden Werte in Untermenüs geändert werden (Abb. 1, Schaltflächen „Details“).

Nach der gleichen Struktur erfolgt die Eingabe verschiedener Bausteine, in denen mehrere Gebäude in Anlehnung an Bauabschnitte zusammengefasst werden. Hier können zusätzliche Erzeuger, aber auch Möglichkeiten der Erzeugung und Speicherung erneuerbarer Energien angegeben werden, passende Anlagenkennwerte bzw. -größen werden selbstständig errechnet. Dieser Zwischenschritt ist insbesondere für eine differenzierte Betrachtung der Wärmenetzverluste durch die Abhängigkeit von verschiedenen Wärmedichten notwendig.

Das Quartier als dritte Ebene setzt sich aus mehreren Bausteinen zusammen, auch hier mit der Möglichkeit der Definition von Erzeugungs- und Speichereinheiten. Zusätzlich kann auf der Quartiersebene ein Modal Split definiert werden, wodurch auch Verkehrsemissionen und zusätzliche Strombedarfe durch Elektromobilität im Stadtgebiet berechnet und berücksichtigt werden.

LIKE-Q stellt die Ergebnisse nach Abschluss der Berechnung direkt in der Oberfläche dar (Abb. 2), in der sich bis zu drei Gebäude, Bausteine oder Quartiere vergleichend nebeneinander anzeigen lassen. Es werden der stromseitige Endenergiebedarf, der eingespeiste Strom, der Endenergiebedarf für die



Abbildung 2: Ergebnisseite von LIKE-Q. In Balkendiagrammen werden Endenergiebedarfe für Strom und Wärme sowie die personenbezogenen CO₂-Emissionen für bis zu drei Objekte angezeigt, sodass sich verschiedene Konzepte schnell vergleichen lassen.

Wärmeversorgung und abschließend die personenbezogenen CO₂-Emissionen in einem Balkendiagramm dargestellt. Angezeigt werden je nach Auswahl Monats- oder Jahresbilanzen. Die Darstellung ist so angelegt, dass ein Vergleich unterschiedlicher Lösungen zahlenbasiert und damit belastbar möglich ist.

Während der Berechnung werden die Ergebnisse zusätzlich in Excel-Dateien gespeichert, die sich aus der Oberfläche heraus aufrufen lassen. Hier sind die unterschiedlichen Bedarfe und ihre Deckungen als Tortendiagramme aufgeführt. Auch lässt sich aus den Excel-Dateien der Eigendeckungsanteil für Strom- und Wärmeversorgung entnehmen.

PROGRAMMAUFBAU

Die Modellierung der einzelnen Komponenten erfolgt größtenteils mit vereinfachten physikalischen Modellen, zum einen um Rechenzeit zu sparen, zum anderen, da die Auswirkungen der vereinfachten Berechnung auf das Ergebnis gering sind. Im Folgenden werden die verwendeten Modellierungs- und Auslegungsansätze der Komponenten kurz erläutert.

Alle Modelle rechnen jeweils mit der Einheit kWh/15 Minuten. Wärmeerzeuger können für Trinkwarmwasser- und/oder Heizwärme-Bereitstellung gewählt werden, wodurch auch entsprechende Speicher geladen werden.

Die zur Berechnung benötigten Lastprofile für Haushaltsstrom, Trinkwarmwasser (TWW) und Heizwärme (HW) aller Gebäudetypen sowie Strahlungs- und Temperaturdaten für alle 15 Klimazonen liegen in einem Unterordner als einfache Textdateien vor und werden erst bei Bedarf zur Laufzeit eingelesen. Das Wärmebedarfsprofil wurde dabei im Vorfeld durch EnergyPlus-Simulationen der

Typgebäude ermittelt, das Haushaltsstromprofil folgt den BDEW-Vorgaben, das TWW-Profil den EU Tapping Cycles.

Solarthermie-Anlage (ST-Anlage)

Der nutzbare Ertrag der ST-Anlage richtet sich nach der Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt des Kollektors. In Abhängigkeit des Massenstroms und der spezifischen Wärmekapazität des Wasser-Glykol-Gemisches im Kollektor kann die Temperaturerhöhung über den Kollektorwirkungsgrad in Kombination mit der Sonneneinstrahlung berechnet werden. Da der Wirkungsgrad von der Kollektoraustrittstemperatur abhängt, wird dieser iterativ nach Bollin et al. (2009) berechnet. Die Eintrittstemperatur ergibt sich durch die untere Speichertemperatur zum jeweiligen Zeitpunkt. Es sind Werte für Flach- und Vakuumröhrenkollektoren hinterlegt.

Die Fläche der ST-Anlage für reine TWW-Erzeugung wird standardmäßig mit 1,5 m² pro Einwohner dimensioniert, bei zusätzlicher Heizungsunterstützung erhöht sich dieser Wert auf 2,5 m² pro Einwohner. In Kombination mit Kurz- und Langzeitwärmespeichern erfolgt die Auslegung nach Fisch et al. (2001).

Wärmepumpe (WP)

In dem Berechnungstool sind drei WP-Typen hinterlegt, für die jeweils ein *Coefficient Of Performance* (COP)-Kennfeld hinterlegt ist, das eine durchschnittliche am Markt erhältliche WP abbildet.

- Inverter-Luft-Wasser-WP (LWWP)
- On-Off-Sole-Wasser-WP (SWWP)
- On-Off-Wasser-Wasser-WP (WWWP)

Der COP errechnet sich in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur des Heizungssystems und der Temperatur der Wärmequelle. Der Nutzer kann zwischen drei verschiedenen, konstanten Vorlauftemperaturen des Heizungssystems wählen,

für die TWW-Bereitung ist ein Wert von 55 °C fest vorgegeben. Die Temperatur der Wärmequelle ergibt sich bei der LWWP als Außentemperatur, bei SWWP und WWWP ist diese ebenfalls konstant und eine Nutzereingabe. Der Strombedarf pro Zeitschritt ergibt sich durch Division des aktuellen Wärmebedarfs durch den momentanen COP.

Die Leistung der Wärmepumpe im Gebäude wird so ausgelegt, dass die maximal auftretende Leistungsanforderung gedeckt werden kann. In Kombination mit einem Langzeitwärmespeicher erfolgt die Auslegung nach Erkenntnissen aus futureSUN (2019).

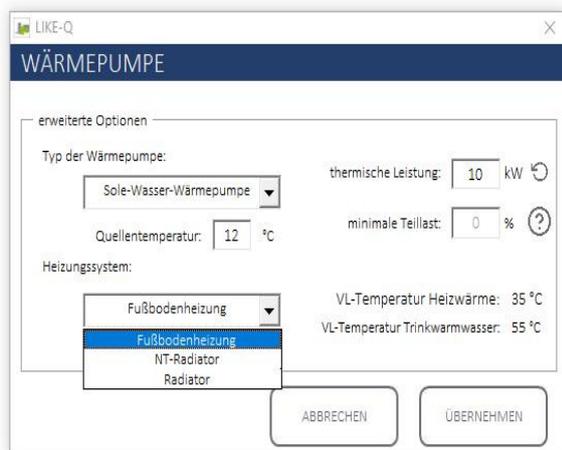


Abbildung 3: Dialog zur Beschreibung der Details der Wärmepumpe. Das Heizungssystem bestimmt die Vorlauftemperatur und damit wesentlich den COP der Wärmepumpe.

Blockheizkraftwerk (BHKW)

Das BHKW wird immer wärmegeführt betrieben, Wirkungsgrade für Wärme- und Stromerzeugung werden als konstant angenommen. Diese werden entweder vorgegeben oder anhand von Gesamtwirkungsgrad und Stromkennzahl errechnet. Weiterhin berücksichtigt das BHKW Vorgaben zu minimaler Laufzeit und minimaler Teillast.

Die Standardauslegung des BHKW führt zu 4.500 Volllaststunden. Die entsprechende Leistung ergibt sich durch das bekannte Wärmebedarfsprofil.

Sonstige Wärmeerzeuger

Als sonstige Wärmeerzeuger werden zusammenfassend Brennkessel, Fernwärme, Stromheizung und Heizwerk bezeichnet. Der Wirkungsgrad in Bezug auf die Leistungsanforderung wird als konstant angenommen, lediglich der Brennstoff und damit der Endenergiebedarf variiert. Die Auslegung erfolgt so, dass die maximale Leistungsanforderung gedeckt werden kann.

Kompressionskältemaschine (KKM)

Der Kältebedarf von Nichtwohngebäuden wird immer von einer ausreichend dimensionierten Kompressionskältemaschine gedeckt. Das *Energy Efficiency Ratio*

wird außentemperaturabhängig anhand Leistungsdaten einer marktüblichen KKM mit einem Temperaturniveau von 6°C/12°C berechnet.

Photovoltaik-Anlage (PV-Anlage)

Der Ertrag der PV-Anlage ergibt sich durch die aus den Strahlungsdaten bekannte Einstrahlung multipliziert mit dem als konstant angenommenen Wirkungsgrad der PV-Module. Der in die Anlage integrierte Wechselrichter arbeitet ebenfalls mit einem konstanten Wirkungsgrad.

Die Fläche der Photovoltaik-Anlage beträgt standardmäßig 100% der belegbaren Dachfläche, die aufgrund von Ausrichtung und Dachform bestimmt wird.

Elektrischer Energiespeicher (EES)

Der elektrische Energiespeicher berücksichtigt den Lade- und Entladewirkungsgrad des Speichers selbst, außerdem einen Tiefsetzsteller für Strom aus der PV-Anlage, einen Gleichrichter für Strom aus dem BHKW sowie einen Wechselrichter für Strom, der entladen wird. Eine Selbstentladung wird nicht berücksichtigt.

Standardmäßig erfolgt die Auslegung mit 1 kWh pro kWp der Erzeugerleistung.

Thermischer Energiespeicher (TES)

Der Wärmespeicher wird lediglich über Energiebilanzen berechnet, sodass zu jedem Zeitpunkt ein Ladezustand in kWh bekannt ist, aus dem die Berechnung der mittleren Speichertemperatur erfolgt. Obere und untere Speichertemperatur werden durch eine vorgegebene, konstante Temperaturspreizung berechnet.

Die Bereitschaftsverluste des Speichers werden über einen Zeitkonstanten-Ansatz (Dohmann 2016) berechnet.

Im Gebäude erfolgt die Auslegung des TWW-Speichers so, dass die maximal auftretende Anforderung für eine Viertelstunde allein aus dem Speicher gedeckt werden kann. Die Auslegung des HW-Speichers erfolgt mit 40 Litern pro Kilowatt maximaler Heizlast des Gebäudes.

Wärmenetz

Die Bestimmung der Wärmenetzverluste erfolgt in Abhängigkeit des Temperaturniveaus des Wärmenetzes sowie der Wärmedichte des Gebiets nach Erkenntnissen aus ZR WOB (2020). Die Wärmedichte ergibt sich durch Division des Gesamtwärmebedarfs mit der Fläche des Bruttobaulands. Es sind jeweils Funktionen für die Temperaturniveaus 110°C/60°C, 90°C/50°C und 75°C/45°C hinterlegt.

Mobilität

Für die Berücksichtigung der Emissionen der Nahmobilität sind die Angabe der Jahrespersonenkilometer sowie der Aufteilung der

Wegstrecken auf die Sektoren motorisierter Individualverkehr (MIV), öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV), Fahrrad- und Fußverkehr nötig. Über eine vorzuziehende Marktdurchdringung der E-Mobilität im MIV und ÖPNV wird der Anteil elektrisch zurückgelegter Kilometer ermittelt. Die jahreszeitabhängige Verteilung der Personenkilometer folgt den Ergebnissen aus BMVBS et al. (2010).

Die Gesamtemissionen des Verkehrs berechnen sich über die Angabe einer mittleren Emission pro Personenkilometer für MIV und ÖPNV. Die Emissionen von E-MIV und E-ÖPNV berechnen sich über das zum Zeitpunkt des Ladevorgangs momentane Emissionsäquivalent des Strommix.

Grundlage der Berechnung des Strombedarfs ist Bornhorst (2016), nach dem der Strombedarf der Ankunfts-wahrscheinlichkeit der Personen an ihrem Zuhause folgt. Es findet also kein Ladevorgang am Arbeitsplatz statt. Die Fahrzeuge des E-ÖPNV werden durchgehend zwischen 23 Uhr und 6 Uhr geladen. Es werden keine variierenden Ladeleistungen berücksichtigt. Die Berechnung der Emissionen durch Elektromobilität erfolgt erst auf Quartiersebene, da der Ansatz bereits eine Gleichzeitigkeit impliziert.

PROGRAMMABLAUF

Bei der Berechnung werden zunächst die Energieströme für alle Gebäude unter Einbezug der jeweiligen Komponenten nacheinander berechnet und die Ergebnisse in Form von resultierenden Bedarfsprofilen für Strom und gegebenenfalls Wärme zwischengespeichert. Anschließend erfolgt die Bilanzierung auf Bausteinebene, zuletzt für die Quartiersebene. Auf der Quartiersebene werden nach Abschluss der Bilanzierung die resultierenden CO₂-Äquivalente für alle Objekte berechnet. Das Vorgehen wird im Folgenden genauer erläutert.

Gebäudeebene

Zu Beginn der Berechnung werden zunächst die Haushaltsstrom-, Anlagenstrom-, TWW- und HW-Bedarfsprofile des jeweiligen Gebäudetyps eingelesen und mit der Bruttogeschossfläche sowie dem spezifischen Energiebedarf skaliert, sodass sich jeweils ein viertelstündliches Lastprofil mit der Einheit kWh pro 15 Minuten ergibt.

Mischnutzungen von Gebäuden werden über flächengewichtete Addition von Einzelprofilen für Wohn- und Nichtwohngebäude berücksichtigt. In diesen Einzelprofilen ist jeweils ein adiabater unterer Gebäudeabschluss (Wohnnutzung in den Obergeschossen) und ein adiabater oberer Gebäudeabschluss (Gewerbe im Erdgeschoss) berücksichtigt.

Gegebenenfalls werden auch das zu Klimazone, Ausrichtung und Aufstellwinkel passende Strahlungsprofil sowie der Außentemperaturverlauf eingelesen.

Anschließend erfolgt die Bilanzierung in einer Schleife, die jede Viertelstunde des Jahres durchläuft, also 35040 Wiederholungen aufweist. Innerhalb des Codes ist die Bilanzierung in Wärmebilanz und Strombilanz unterteilt. Sofern eine Komponente nicht vorhanden ist oder kein Bedarf vorliegt, wird der entsprechende Schritt übersprungen. Die Wärmeerzeuger decken jeweils nur den Bedarf für TWW und/oder HW, je nach Angabe des Nutzers. Die Berechnung der Wärmebilanz erfolgt nach folgendem Schema:

1. Auskühlverluste der Speicher
2. Ertrag ST-Anlage mit aktueller unterer Speichertemperatur
3. Bedarfsdeckung aus Speicher
4. Bedarfsdeckung und Ladung der Speicher mit BHKW
5. Bedarfsdeckung und Ladung der Speicher mit WP
6. Bedarfsdeckung und Ladung der Speicher mit sonstigem Wärmeerzeuger
7. Deckung des Kältebedarfs über KKM

Ist am Ende des Zeitschritts noch ein Wärmebedarf vorhanden, endet die Berechnung mit einer Fehlermeldung, sodass der Nutzer seine Eingaben anpassen kann.

Mit bekanntem Strombedarf für Wärme- und Kältebereitstellung wird das Gebäude anschließend stromseitig bilanziert. Generell werden immer zunächst Haushalts- und Anlagenstrom gedeckt, anschließend der Strom für die Wärme- und zuletzt der Strom für die Kälteerzeugung. Ein eventueller Rest wird in den EES geladen.

Zunächst wird der Ertrag der PV-Anlage verrechnet, anschließend der Stromertrag des BHKW. Im nächsten Schritt erfolgt gegebenenfalls das Entladen des EES. Ein eventueller Restbedarf wird durch Netzbezug gedeckt.

Nach Abschluss der Bilanzierung des Gebäudes werden alle Endenergiebedarfe anhand der hinterlegten Wirkungsgrade berechnet und in einer eigenen Klasse gespeichert. Darüber hinaus werden resultierende Profile für Strom- und gegebenenfalls Wärmebedarf des Gebäudes gespeichert, wenn Strom eingespeist wird auch ein Profil mit dem zeitlichen Verlauf des Überschusses. Abschließend wird eine Auswertung als Excel- sowie als Textdatei gespeichert.

Baustein- und Quartiersebene

Die Berechnung des Bausteins erfolgt, nachdem alle in ihm beinhalteten Gebäude berechnet wurden. Die resultierenden Bedarfs- und Überschussprofile der Gebäude werden eingelesen, mit der Anzahl der Gebäude multipliziert und zu einem Bedarfsprofil des Bausteins addiert. Wärmenetzverluste werden in Abhängigkeit des Temperaturniveaus addiert.

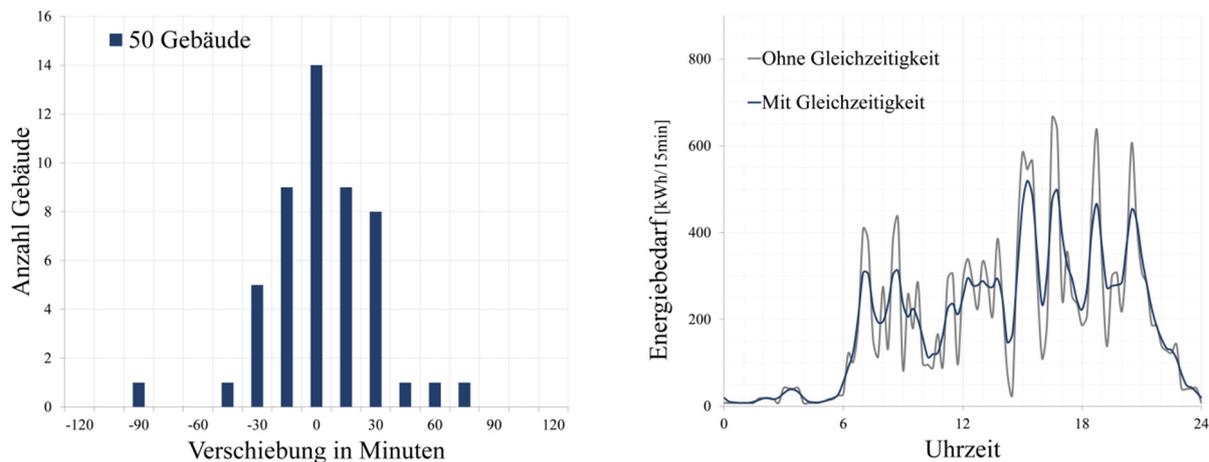


Abbildung 4: Durch Ziehung von Stichproben aus einer Gauß-Verteilung mit in Abhängigkeit der Anzahl der Gebäude variierender Standardabweichung ergibt sich die Verschiebung der Lastprofile für eine Berücksichtigung der Gleichzeitigkeit.

Zur Berücksichtigung von Gleichzeitigkeitseffekten erfolgt eine Glättung des Gesamtprofils des Bausteins durch Verschiebung der Einzelprofile aller beinhalteten Gebäude um eine gewisse Anzahl an Zeitintervallen. Die Aufteilung der Profile auf die 17 Verschiebungsintervalle erfolgt über eine Gauß-Verteilung, deren Standardabweichung in Abhängigkeit der Anzahl der vorhandenen Gebäude variiert (Abbildung 4).

Das Verfahren glättet insbesondere Lastprofile mit hohen Spitzen. Beispielhaft reduziert sich die Leistungsanforderung von 500 gleichartigen Einfamilienhäusern mit elektrischer TWW-Bereitung um 83% im Gegensatz zum summierten Wert und liegt damit laut TAEV (2012) in dem Bereich für allgemeinen Bedarf. Auf bereits geglättete Profile hat der Ansatz lediglich geringe Auswirkungen. Für 500 Wohneinheiten reduziert sich der maximale Leistungsbedarf für Haushaltsstrom um lediglich 3%, da in diesem Fall schon auf Gebäudeebene skalierte Standardlastprofile verwendet werden.

Zur Vereinfachung des Berechnungsablaufs wird das Vorgehen auch auf das Überschussstromprofil angewendet, da sonst jeder Gebäudetyp bis zu 17-mal berechnet werden müsste. Die Folge hieraus ist ein leicht höherer Eigendeckungsanteil im Baustein. Im Hinblick auf den Einsatzzeitpunkt wird diese Abweichung akzeptiert, stellt aber auch ein Weiterentwicklungspotential der Software dar.

Die Dimensionierung von Kurz- und Langzeitwärmespeicher erfolgt auf Basis der Baustein- bzw. Quartierslastprofile.

Die Bilanzierung findet in Anlehnung an das Vorgehen auf Gebäudeebene statt. Bei der Ermittlung des zur Verfügung stehenden regenerativ erzeugten Stroms werden neben Erzeugern auf Bausteinebene zusätzlich die Überschüsse der Gebäude berücksichtigt und zur Deckung verwendet beziehungsweise im EES gespeichert. Auch ändert sich die Betriebsweise der WP, die lediglich dann in

Betrieb geht, wenn regenerativ erzeugter Strom zur Verfügung steht. Das BHKW deckt im Gegensatz zur Gebäudeebene lediglich den direkten Bedarf des Wärmenetzes, der Speicher wird nur beladen, wenn aufgrund der Mindestlaufzeit ein ansonsten ungenutzter Überschuss anfallen sollte. Nach Abschluss der Berechnung werden auch für den Baustein resultierende Bedarfs- und Überschussprofile sowie eine Auswertung gespeichert.

Die Berechnung des Quartiers erfolgt wiederum nachdem alle beinhalteten Bausteine berechnet wurden. Vor der Bilanzierung erfolgt hier jedoch zusätzlich die Berechnung des Strombedarfs für E-MIV und E-ÖPNV. Die Bilanzierung selbst erfolgt wie auf Bausteinebene, lediglich ergänzt um die Deckung des Strombedarfs für Mobilität. Diese erfolgt mit der niedrigsten Priorität.

Berechnung der resultierenden CO₂-Äquivalente

Zur Berechnung der resultierenden CO₂-Äquivalente des Strommixes werden zunächst der aus allen Bausteinen eingespeiste, der auf Quartiersebene erzeugte und der aus dem Netz bezogene Strom für jeden Zeitpunkt addiert. Da auch die Endenergiebedarfe für alle Erzeuger für jeden Zeitpunkt bekannt sind, lässt sich anhand der vorgegebenen CO₂-Äquivalente für die verschiedenen Energieträger für jeden Zeitpunkt ein resultierender Wert g(CO₂)/kWh bestimmen.

Speist das Quartier zu einem Zeitpunkt Strom ins Netz ein, kann die Gutschrift anhand des momentanen Äquivalents des Strommixes bestimmt werden. Diese Gutschrift wird auf alle Erzeuger und zu diesem Zeitpunkt einspeisende Bausteine verteilt. Der Verteilungsschlüssel ergibt sich wiederum aus der Menge des eingespeisten Stroms und des dafür erzeugten CO₂. Speist ein Baustein viel Strom aus einem BHKW mit schlechtem Äquivalent ein, erhält er eine geringere Gutschrift als ein Baustein, der zwar weniger Strom einspeist, dafür jedoch durch PV-Anlagen mit weniger Emissionen pro Einheit erzeugt.

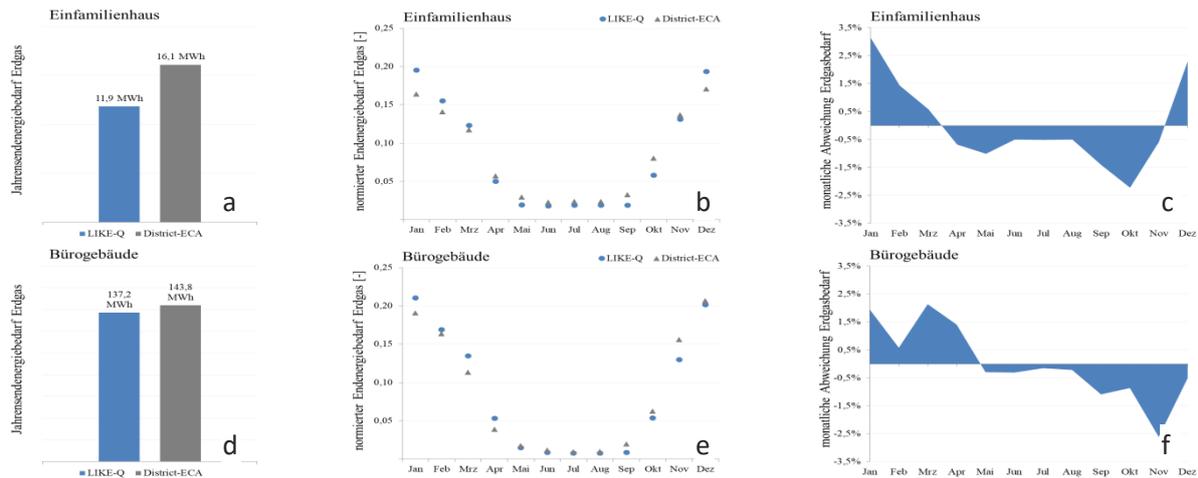


Abbildung 5: Vergleich der Ergebnisse von LIKE-Q und District-ECA. Trotz gleicher Nutzenergiebedarfe unterscheidet sich der Jahresendenergiebedarf aufgrund der verschiedenen Berechnungsansätze mitunter deutlich. Die monatliche Abweichung bezogen auf den normierten Endenergiebedarf zeigt jedoch gute Übereinstimmung.

Durch den bekannten Strommix im Quartier wird anschließend nach gleicher Vorgehensweise der Strommix im Baustein berechnet.

Dieses Vorgehen ermöglicht die Abbildung der Wechselwirkung unterschiedlicher Gebäude in einem Baustein. Dies sei an einem fiktiven Baustein mit fünf Einfamilienhäusern (EFH) mit PV-Anlagen und einem Industriegebäude (IG) mit hohem Strombedarf an einem Sommertag erläutert.

Alle fünf EFH erzeugen mit ihrer PV-Anlage zwar einen Überschuss, dennoch weist der Baustein aufgrund des hohen Strombedarfs des IG einen Strombezug auf. Auch wenn das übergeordnete Quartier Strom einspeist und eine Gutschrift erhält, wird diese Gutschrift also nicht an den Baustein weitergegeben, sodass auch die EFH keine Gutschrift bekommen. In der Folge ist die CO₂-Bilanz der Gebäude deutlich schlechter als würde die Gutschrift gegen das Netzstromäquivalent berechnet, das IG steht hingegen deutlich besser dar.

Da dieser Ansatz unter Umständen nicht gewünscht ist, lässt sich die Ergebnisübersicht umschalten.

VERGLEICH MIT DISTRICT-ECA

In einer frühen Planungsphase sind detaillierte Simulationen aufgrund der zahlreichen unbekannt Randbedingungen nur wenig aussagekräftig, weshalb der Aufwand der Erstellung der Simulationsmodelle in keinem Verhältnis zum Nutzen steht. Aus diesem Grund wird die einfachere Abschätzung von LIKE-Q nicht gegen ein komplexes TRNSYS- oder Modelica-Modell verglichen.

LIKE-Q ist in der Anwendung insbesondere für Personen gedacht, die wenig Erfahrung mit Simulationsprogrammen aufweisen. Eine ähnliche Zielgruppe spricht das Programm „District Energy Concept Advisor (DECA)“ (Fraunhofer IBP 2019) an. Auch das Programm „Urban ReNet“ (Schlussbericht 2015) verfolgt diesen Ansatz, ist aber derzeit nicht verfügbar. Der Vergleich der Ergebnisse von LIKE-Q

erfolgt daher gegen die Ergebnisse des DECA. Hierbei ist zu beachten, dass der DECA eine Berechnung nach EnEV bzw. DIN V 18599 durchführt und sich somit von LIKE-Q unterscheidet. Für den Vergleich werden in beiden Programmen die gleichen flächenspezifischen Nutzenergiebedarfe für Nutzerstrom, Trinkwarmwasser und Heizwärme gewählt, auch die Flächen von ST- und PV-Anlagen sind identisch. Darüber hinaus werden die jeweils vorgeschlagenen Standardwerte genutzt, da sich beide Programme in ihren Eingabemöglichkeiten unterscheiden.

Es wird folgendes Beispiel berechnet.

- 1x EFH mit Gas-Brennwertkessel (GBWK)
- 1x EFH mit GBWK und ST-Anlage zur TWW-Unterstützung
- 1x EFH mit GBWK und ST-Anlage zur TWW- und HW-Unterstützung
- 1x EFH mit Wärmepumpe
- 1x MFH mit GBWK und ST-Anlage zur TWW-Unterstützung
- 1x MFH mit Wärmepumpe
- 1x Bürogebäude
- 1x zentrale PV-Anlage (800 m²)

Die Gebäude werden in einem Quartier zusammengefasst, berechnet und die Ergebnisse bewertet.

Abbildung 5a und d zeigen, dass sich die berechneten Jahresendenergiebedarfe unterscheiden. Dies liegt in der unterschiedlichen Berechnung der Verteil- und Erzeugerverlusten begründet. Die Verteilverluste der Heizung sind bei LIKE-Q bereits in den Bedarfsprofilen berücksichtigt, die Verluste der TWW-Bereitstellung werden pauschalisiert abgebildet, Verluste der Wärmespeicher werden dynamisch berechnet. DECA berechnet die Verluste nach der EnEV/DIN V 18599.

Die Darstellungen der monatlichen Endenergiebedarfe normiert auf den jeweiligen Jahresendenergiebedarf (Abb. 5b, e) zeigen eine gute Übereinstimmung. Über alle Gebäude hinweg beträgt die maximale Abweichung bezogen auf den normierten Erdgasbedarf 4,1 %, auf den normierten Strombedarf -1,7 %. Zu einem geringen Teil durch Ausgleichseffekte bedingt stimmen auch Erdgas- und Strombedarf des Quartiers gut überein, gasseitig liegt die maximale Abweichung bei -2,5%, stromseitig bei -1,7%. Insgesamt ist der von LIKE-Q berechnete Erdgasbedarf um 7%, der Strombedarf um 10% geringer. Da die normierten Verläufe gut übereinstimmen, ließen sich die Unterschiede durch Verändern der Nutzenergiebedarfe weiter verringern.

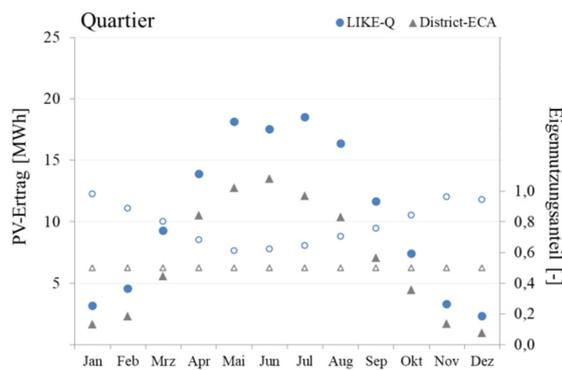


Abbildung 6: Bei der Berechnung des PV-Ertrags zeigen sich deutlich Unterschiede. DECA nimmt vereinfacht einen konstanten Eigennutzungsanteil an.

Deutliche Unterschiede treten in der Berücksichtigung der PV-Anlage auf (Abb. 6). Während DECA über das ganze Jahr einen konstanten Eigennutzungsanteil von 50% annimmt, wird dieser in LIKE-Q in Abhängigkeit von PV-Ertrag und Strombedarf viertelstündlich berechnet und über den Monat gemittelt. Aufgrund der kleinen PV-Anlage sind die höheren Deckungsanteile in Wintermonaten deutlich realistischer.

DISKUSSION

LIKE-Q ist ein Programm zur Abschätzung der CO₂-Emissionen eines Neubauquartiers und verknüpft einen Bilanzierungsansatz mit einer einfachen und intuitiven Eingabe. Hierdurch hebt es sich deutlich von Simulationsprogrammen ab, die einen anderen Anwenderkreis ansprechen und darüber hinaus in frühen Projektphasen aufgrund der fehlenden Randbedingungen nicht mit einem gerechtfertigten Zeiteinsatz anwendbar sind.

DECA verfolgt einen ähnlichen Ansatz wie LIKE-Q, zeigt jedoch aufgrund eines anderen Berechnungsansatzes abweichende Ergebnisse. Der Unterschied ist in Anbetracht der zu einem Wettbewerbsentwurf vorliegenden Daten vernachlässigbar.

Deutliche Unterschiede zeigen sich jedoch bei der Bewertung von Eigendeckungsanteilen. Durch den

viertelstündlichen Bilanzierungsansatz von LIKE-Q sind die errechneten Werte deutlich realistischer als die pauschalisierten Werte von DECA. Je höher die dezentrale Erzeugung bei der Bewertung verschiedener Konzepte ins Gewicht fällt, desto eher ist LIKE-Q hier das geeignetere Programm.

Darüber hinaus bietet LIKE-Q auch in der Eingabe der Gebäude Vorteile. Die Oberfläche reagierte in den Vergleichen deutlich schneller als die des DECA, insbesondere das Anlegen einer Vielzahl an Gebäuden stellt sich einfacher dar. Durch die zusätzlich eingeführte Ebene der Bausteine lassen sich außerdem Vernetzungseffekte und lokale Nahwärmenetze im Kontext des gesamten Quartiers abbilden. Weiterhin ist die Abbildung des Modal Splits und somit die Berücksichtigung des Verkehrs, wenn auch vereinfacht, nur in LIKE-Q möglich.

Durch die verständliche Ordnerstruktur, lesbare Lastprofile und eine ausführliche Dokumentation bietet LIKE-Q eine hohe Nachvollziehbarkeit. LIKE-Q ist in Kürze kostenfrei als Demoversion über siz-energie-plus.de beziehbar.

LITERATUR

- BMU. 2019. Klimaschutz in Zahlen: der Sektor Gebäude.
- BMVBS, ifas, and DLR. 2010. Mobilität in Deutschland 2008: Struktur-Aufkommen-Emissionen-Trends. Ergebnisbericht.
- Bollin, E., and Becker, M. 2009. Automation regenerativer Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden.
- Bornhorst, D. 2016. Integration der E-Mobilität im klimaneutralen Stadtquartier. Bachelorarbeit, Furtwangen.
- Dohmann, J. 2016. Thermodynamik der Kälteanlagen und Wärmepumpen. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
- Fisch, N., Möws, B., and Zieger, J. 2001. Solarstadt: Konzepte, Technologien, Projekte. Kohlhammer, Stuttgart.
- Fraunhofer IBP. 2019. District Energy Concept Adviser: Edition EU MODER 2018..
- futureSUN. 2019. „Analyse, Bewertung und Entwicklung zukunftsfähiger Anlagenkonzepte für solare Nahwärmeanlagen mit saisonaler Wärmespeicherung“: Förderkennzeichen 0325897A.
- Schlussbericht. 2015. EnEff:Stadt - UrbanReNet Phase II: Weiterführung und inhaltliche Vertiefung des Forschungsprojekts: Förderkennzeichen 0327832E, Darmstadt.
- TAEV 2012, Bundeseinheitliche Fassung, Oesterreichs E-Wirtschaft Akademie GmbH, Wien.
- ZR WOB. 2020. EnEff:Stadt: Vernetzte Quartiere für den Zukunftsraum Wolfsburg: Förderkennzeichen 03ET1327A, Braunschweig.

BEWERTUNG DES WÄRMEBEDARFS DEUTSCHER BESTANDSWOHNGEBÄUDE MIT HILFE ÖRTLICH UND ZEITLICH AUFGELÖSTER GEBÄUDESIMULATIONEN

C. Vering¹, M. Mortimer¹, M. Nürnberg¹ und D. Müller¹

¹Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, RWTH Aachen, Deutschland

KURZFASSUNG

Die optimale Auslegung von Luft-Wärmepumpen ist in Deutschland aufgrund der hohen Gebäudeanzahl und dynamischer Betriebsrandbedingungen komplex. Neben Änderungen der Umgebungsbedingungen variieren gleichzeitig Gebäudelasten. Eine detaillierte Optimierung jeder Wärmepumpe zur Versorgung ist daher nur mit sehr hohem Aufwand möglich.

Zur Reduktion der Komplexität und zum Verständnis der Betriebsdynamik tragen systematische Wetter- und Gebäudeanalysen bei. Diese können mit Hilfe örtlich und zeitlich aufgelöster Gebäudesimulationen durchgeführt werden.

Zur Verwendung von Gebäudesimulationen sind valide Eingangsdaten essentiell. Diese werden in statistischer Form systematisch aufgearbeitet und als Landkarten zur Verfügung gestellt. Eine Inputdatenklassifizierung reduziert den Rechenaufwand von etwa 18 Millionen Gebäudesimulationen für ganz Deutschland auf 3520.

ABSTRACT

Optimal design of heat pumps in Germany is complex due to the large number of buildings and dynamic operating conditions. In addition to changes in the ambient conditions, building loads vary. A detailed optimisation of each heat pump covering the heat demand is therefore only possible at great expense.

Systematic weather and building performance analyses help to understand the operating dynamics of heat pump systems. These can be carried out by spatial and temporal resolved building performance simulations (BPS).

Valid input data are essential to utilize BPS. In this work, data are statistically processed and made available as geographical maps. Regarding Germany, input data processing reduces the computational effort from about 18 million BPS to 3520.

EINLEITUNG

Etwa 30 % der Emissionen in Deutschland sind auf die Bereitstellung von Wärme in Gebäuden zurückzuführen [Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2017]. Größtenteils wird Wärme durch konventionelle Technologien, die Energie aus fossilen Quellen beziehen, bereitgestellt. Im Rahmen der Energiewende stellen Wärmepumpensysteme eine emissionsarme Alternative dar, um konventionelle Technologien nachhaltig abzulösen.

Im Vergleich zu konventionellen Technologien ist die Effizienz der Wärmepumpe äußerst temperatur- und lastabhängig. Unter- oder Überdimensionierungen der Wärmepumpe führen zu Teillastbetrieb, erhöhten Schaltvorgängen oder vermehrter Gebäudeunterversorgung, die durch Heizstabzuschaltung kompensiert werden muss. Diese Betriebsbedingungen führen zu hohen Effizienzverlusten, sodass die Potentiale der Technologie nicht vollständig ausgeschöpft werden können. Zur optimalen Auslegung und zum daraus folgenden optimalen Betrieb von Wärmepumpensystemen ist somit die Kenntnis des zu deckenden Bedarfs unerlässlich. [Karlsson, 2007]

Ein Wärmepumpensystem wird im Rahmen dieses Beitrags als ein monoenergetisch bivalentes Versorgungssystem bestehend aus einer Luft-zu-Wasser-Wärmepumpe (kurz: Wärmepumpe) und einem elektrischen Heizstab aufgefasst. Zur zeitlichen Entkopplung von Erzeugung und Bedarf werden ein Warmwasser- und ein Trinkwarmwasserspeicher eingesetzt. Sie dienen damit zur Reduktion von Schaltvorgängen. Ein optimales Auslegungsverfahren muss folglich die Größen dieser Einzelkomponenten festlegen und eine Betriebstrategie vorsehen.

In der Literatur sind in Deutschland zwei standardisierte Auslegungsverfahren anerkannt, welche in den Richtlinien DIN EN 15450 [DIN, 2007] und VDI 4645 [VDI, 2018] beschrieben werden. Diese Verfahren legen Wärmepumpensysteme nach Normheizlast und temperaturabhängiger Heizleistung aus. Die Temperaturbedingungen werden standortgebunden vorgegeben. Die Berechnung der Heizleistung erfolgt nach [DIN EN 12831, 2017] und

beschreibt die thermische Leistung, die zur Aufrechterhaltung konstanter Innenraumtemperaturen über die Gebäudehülle an die Umgebung abführt wird. Der obere Grenzwert dieser Wärmeleistung fällt bei Normaußentemperatur an und wird Heizlast genannt [DIN EN 12831, 2017]. Der Betrieb der Wärmepumpensysteme wird durch die Berücksichtigung einer Heizkurve mit einer Hysterese um die Soll-Temperaturen vorgesehen.

Vering et al. zeigen in [Vering, 2019] exemplarisch für ein Bestandsgebäude, dass mit Hilfe beider Auslegungsverfahren Wärmepumpensysteme ausgelegt und versorgungssicher hinsichtlich der Speichertemperaturen betrieben werden können. Die beschriebenen Systeme decken also jeden anfallenden Wärmebedarf bei definierten Außen- und Soll-Temperaturen. In den Verfahren selbst wird jedoch keine Häufigkeitsverteilung von Bedarfen und Temperaturen zur Auslegung hinzugezogen. Diese Art der Auslegung führt demnach zu versorgungssicheren Systemen hinsichtlich möglicherweise auftretender nomineller Leistungen und Temperaturen. Eine optimale Auslegung unter Berücksichtigung häufiger Betriebsbedingungen erfolgt allerdings nicht.

Häufigkeitsverteilungen von Betriebsbedingungen können durch Wetter- und Gebäudeanalysen abgeschätzt werden. Zur Durchführung von Wetteranalysen sind Wetterdaten notwendig. Dieser werden beispielsweise vom deutschen Wetterdienst [Deutscher Wetterdienst, 2015] bereitgestellt. Gebäudeanalysen können sowohl im Feld als auch simulativ durchgeführt werden. Da Felduntersuchungen für etwa 18 Millionen Gebäude einen hohen zeitlichen Aufwand bedeuten und häufig kostenintensiv sowie fehleranfällig sind, werden im Rahmen dieser Arbeit simulative Analysen durchgeführt. Diese dienen der Bestimmung von Häufigkeitsverteilungen von Wärmebedarfen.

Eine Möglichkeit zur Abschätzung typischer Wärmebedarfe im Gebäudebestand stellen örtlich und zeitlich aufgelöste Gebäudesimulationen dar. Die Basis solcher Simulationen bilden parametrierbare Gebäudemodelle. Diese sind in der Literatur verfügbar und werden kommerziell [TRNSYS, 2020, IDA, 2020] und frei verfügbare bereitgestellt [Energy Plus, 2019, Müller, 2016]. Je nach Untersuchungsziel können vereinfachte Einzonen-Modelle, sogenannte „reduced order models“ (ROM) bis hin zu sehr komplexen Mehrzonen-Modellen, den „high order models“ (HOM) eingesetzt werden.

Zur ersten Abschätzung der Häufigkeitsverteilung von Bedarfen deutscher Bestandswohngebäude werden im Rahmen dieser Arbeit ROM verwendet. Zum einen ist deren Berechnungsdauer im Vergleich zu HOM

deutlich reduziert und zum anderen wird durch die statistische Untersuchung vieler Gebäudesimulationen die Ergebnisgüte durch die Verwendung von ROMs nicht wesentlich beeinträchtigt.

Unter Verwendung von Gebäudemodellen aus der quell-offenen Bibliothek AixLib [Müller, 2016] können über ein zusätzliches Tool „Teaser“ [Remmen, 2017] archetypische Gebäudemodelle erstellt und in Modelica mit Dymola simuliert werden [Tiller, 2019]. Die Simulationsergebnisse können analysiert und bewertet werden. Dieser Arbeitsablauf erlaubt unter Verwendung geeigneter Eingangsdaten die Bewertung deutscher Bestandswohngebäude.

Zur Parametrierung von Gebäudemodellen gibt es unterschiedliche Parametersätze. Um auf eine einheitliche Datenbasis zurückzugreifen, die für Deutschland existiert, wird der Zensus 2011 und seine Fortschreibung verwendet. Weitere Datenbanken wie infas 360 wurden aufgrund der Verfügbarkeit bisher nicht untersucht [infas 360, 2020]. Die hier vorgestellte Analyse und die nachfolgende Zusammenfassung der Ergebnisse macht den Zensus für Gebäudesimulationen nutzbar. [Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2015, Statistisches Bundesamt, 2018]

Im Rahmen dieses Beitrags wird ein automatisierter Arbeitsablauf dazu verwendet, eine statistische Übersicht über Wärmebedarfe in Deutschland zu erhalten. Daraus kann eine Wärmebedarfsstruktur für den Gebäudebestand abgeschätzt werden, die als Grundlage zur optimalen Auslegung von Wärmepumpensystemen dienen kann. Dieser Beitrag fördert daher systematisch die optimale Auslegung von Wärmepumpensystemen durch die statistische Bewertung des Wärmebedarfs deutscher Bestandswohngebäude. Dazu werden energetische Gebäudesimulationen durchgeführt:

- in Kapitel 2 wird die Struktur eines Arbeitsablaufs von Eingangsdaten bis zum Wärmepumpensystem vorgestellt.
- Eine Wetter- und Gebäudeanalyse erfolgt in Kapitel 3 auf Basis aufbereiteter Zensusdaten zur Festlegung notwendiger Gebäudesimulationen.
- Die Gebäudebestandsstruktur wird schließlich in Kapitel 4 mit zugehörigen Wärmebedarfsclustern vorgestellt.

Zur abschließenden Einordnung der Ergebnisse wird der kumulierte Gebäudeenergiebedarf mit aktuellen Werten des BMWi verglichen. Der Beitrag wird schließlich zusammengefasst und ein Ausblick für die weitere Verwendung des Arbeitsablaufs wird herausgearbeitet.

WEG ZU EINEM EMISSIONSARMEN GEBÄUDESEKTOR

Die Wärmeversorgung des Gebäudesektors basiert weitestgehend auf konventionellen Technologien, die fossile Energieträger beziehen. Die benötigte Wärme wird durch Verbrennung der Energieträger bereitgestellt. Durch die Verbrennung entstehen Emissionen als direktes Produkt. Eine Emissionsreduktion kann daher lediglich durch eine Reduktion des Bedarfs oder durch effizientere Technologien erfolgen. Bedarfsreduktionen können durch erhöhte Dämmstandards erzielt werden. Diese können jedoch kostenintensiv sein, sodass in vielen Fällen ein Austausch der Technologie einen kostenärmeren Weg beschreibt. Die Verwendung einer effizienteren Technologie, die ebenfalls verbrennungsbasiert operiert, ist begrenzt möglich, da Effizienzgewinne ein Maximum aufweisen.

Eine vielversprechende Technologie, die eine emissionsarme Wärmeversorgung ermöglicht, ist die Wärmepumpe. Die Bereitstellung von Brauchwärme mittels Strom erfolgt durch den Bezug von Umweltwärme ressourcenschonend. Gleichzeitig wird durch die Nutzung von Strom die Elektrifizierung der Wärmebereitstellung vorangetrieben. In zukünftigen Szenarien wird die Stromversorgung durch Technologien realisiert, die größtenteils Energie aus regenerativen Quellen beziehen. Dadurch trägt die Wärmepumpe systematisch zu einem emissionsarmen Gebäudesektor bei.

In Abbildung 1 wird der emissionsarme Gebäudesektor als Ziel formuliert. Unter nationalen Randbedingungen entspricht das einer Reduktion des Primärenergieverbrauchs um 80 % bis 2050. Um dieses ambitionierte Ziel systematisch zu erreichen, muss die Wärmeversorgung im Gebäudesektor umstrukturiert werden. Als Ausgangslage kann in Deutschland dabei von etwa 18 Millionen Gebäuden im Bestand ausgegangen werden.

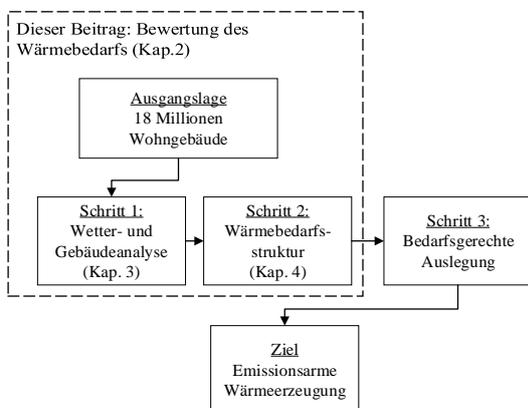


Abbildung 1: Umstrukturierung der Wärmeversorgung von Bestandsgebäuden durch die Integration optimal ausgelegter Wärmepumpen.

Zur Forcierung einer emissionsarmen Wärmeversorgung des Gebäudebestands (Abb. 1) sind drei Schritte notwendig. In einem ersten Schritt wird für Deutschland eine Wetter- und Gebäudeanalyse durchgeführt. Diese wird statistisch durchgeführt und beschrieben. Im nächsten Schritt werden die statistischen Daten als Eingangsparameter für Gebäudesimulationen verwendet, um die örtlich und zeitlich aufgelöste Wärmebedarfsstruktur abzuschätzen. Unter Zuhilfenahme dieser Struktur ist es dann in Schritt 3 möglich, Wärmepumpen bedarfsgerecht auszulegen, um das Potential dieser Technologie ausschöpfen zu können. Im Rahmen dieses Beitrags wird der Weg bis zur Wärmebedarfsstruktur dargestellt. Die bedarfsgerechte Auslegung kann aus Gründen des Umfangs lediglich im Ausblick diskutiert werden.

Die Wetter- und Gebäudeanalyse erfolgt in Kapitel 3 und dient der Bereitstellung valider Eingangsdaten für die Berechnung der Wärmebedarfsstruktur in Kapitel 4. Es werden Wetterdaten vom Deutschen Wetterdienst verwendet [Deutscher Wetterdienst, 2015]. Das vorgestellte Szenario berücksichtigt dabei normale Testreferenzjahre. Eine Abschätzung für kalte und warme Jahre wird nicht beschrieben.

Die zugehörige Gebäudeanalyse wird auf Basis der Daten des Zensus 2011 und dessen Fortschreibung durchgeführt. Der Zensus basiert auf der typischen Beschreibung von Gebäuden und Wohnungszählungen.

Im Rahmen des Zensus 2011 wurden etwa 17,5 Millionen Fragebögen an Gebäudeeigentümer versendet [Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2015]. Die zugehörige Fortschreibung ist zusätzlich eine Hochrechnung auf Basis des Zensus 2011, die durch das Statistische Bundesamt durchgeführt wurde [Statistisches Bundesamt, 2018].

Die Daten des Zensus gelten dabei für alle Regionen, wohingegen sich Wetterdaten häufig auf Städte beziehen. Mit Hilfe dieser Eingangsdaten können dann örtlich und zeitlich aufgelöste Gebäudesimulationen durchgeführt werden.

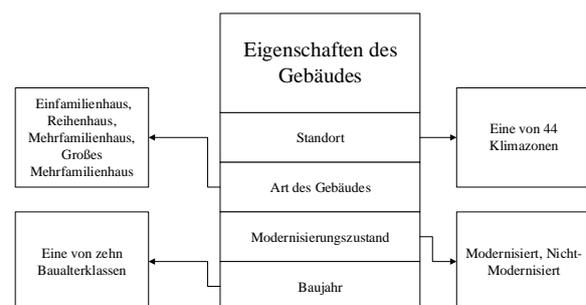


Abbildung 2: Wesentliche Parameter zur Durchführung von Gebäudesimulationen und deren Freiheitsgrade innerhalb dieses Beitrags.

Energetische Gebäudesimulationen erlauben eine Abschätzung von Gebäudebedarfen. Im Rahmen dieser Arbeit werden Gebäudemodelle mit Hilfe des Tools Teaser automatisiert erstellt. Zur Modellerstellung sind unterschiedliche Parameter festzulegen. Diese Parameter sind schematisch in Abbildung 2 dargestellt. Neben der Nettogrundfläche sind der Standort des Gebäudes, die Art des Gebäudes, der Modernisierungszustand und das ungefähre Baujahr notwendig, um eine Grundparametrierung zu erreichen. Die erstellten Modelica-Modelle werden anschließend in Dymola simuliert. Durch die statistische Zuordnung kann für Deutschland die Wärmebedarfsstruktur ermittelt und anschließend zur bedarfsgerechten Auslegung eingesetzt werden.

WETTER- UND GEBÄUDEANALYSE

Auf einer Grundfläche von etwa 357.386 km² sind in Deutschland etwa 18 Millionen Bestandsgebäude verteilt [Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2015]. Die optimale Auslegung von maßgeschneiderten Wärmepumpen für jedes einzelne Gebäude in unterschiedlichen Klimazonen ist daher zeit- und kostenintensiv und lediglich unter sehr hohem Rechenaufwand möglich. Zusätzlich sind Gebäude und deren Verwendung durch die Nutzer zwar nie identisch, aber aus Sicht des Bedarfs sicherlich ähnlich, was eine statistische Untersuchung der Bedarfsverteilung erlaubt.

Zur systematischen Reduktion der 18 Millionen möglichen Simulationen werden die Gebäudeeigenschaften entsprechend der Merkmale aus Abbildung 2 unter der Verwendung von Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes (kurz: DWD) zur Berücksichtigung des Standorts [Deutscher Wetterdienst, 2015] und Statistiken des Zensus 2011 klassifiziert.

Der deutsche Wetterdienst veröffentlicht Daten für jeden Quadratkilometer in Deutschland [Deutscher Wetterdienst, 2015]. Diese Daten sind speziell zusammengestellte Datensätze, die für jede Stunde eines Jahres verschiedene meteorologische Daten enthalten. Sie sollen einen mittleren, aber für das Jahr typischen Witterungsverlauf repräsentieren. Sie haben allerdings nur einen gerigen Nutzen für die vorliegende Arbeit, da im Zensus und in der Fortschreibung ausschließlich Daten zu Stadt- und Landkreisen veröffentlicht sind. Daher muss ein Adaptionsverfahren entwickelt werden, welches die beiden Informationsquellen zusammenführt.

Hierzu wird ein Grenzwert festgelegt, der ein Maß für die Sensitivität eines Parameters auf die Bedarfsberechnung beschreibt. Im Rahmen der Arbeit wird dieser zu 2 kWh/(m²*a) festgelegt. Das entspricht etwa 20 % des Grundparameters mit dem

geringsten Einfluss auf den Wärmebedarf eines Wohngebäudes. Unter Zuhilfenahme des Grenzwerts werden die Wetterdatensätze benachbarter Städte verglichen. Sollte der Standorteinfluss in zwei Städten einen geringeren Einfluss auf den Wärmebedarf haben als 2 kWh/(m²*a), werden die Städte zu einer Klimazone zusammengefasst. Anderenfalls entstehen zwei Klimazonen. Das bedeutet, dass zwei Städte deren Wärmebedarf durch den Wetterunterschied um mehr als 2 kWh/(m²*a) abweicht, nicht in einer Klimazone liegen können. Zur Berechnung des Bedarfs ist ein mittleres deutsches Gebäude verwendet worden.

Insgesamt sind durch diese Grenzwertbetrachtung 44 Klimazonen ermittelt worden, die die gesamte Grundfläche Deutschlands repräsentieren. Es sei darauf hingewiesen, dass die Klimadaten von Städten verwendet wurden, da gerade hier besonders viel Wohngebäude angesiedelt sind.

Zur weiteren Klassifizierung von Gebäuden ist deren Art ein einflussreicher Parameter. Hierzu zählt die Berücksichtigung der unterschiedlichen Gebäudetypen von Gebäuden [Institut für Wohnen und Umwelt, 2015]. In diesem Beitrag werden vier Gebäudetypen implementiert:

- Freistehende Ein- oder Zweifamilienhäuser,
- Reihenhäuser,
- Mehrfamilienhäuser und
- große Mehrfamilienhäuser.

In einem nächsten Schritt wird der Modernisierungszustand zur Beschreibung des Gebäudes nach [Cischinsky, 2016] vorgestellt. Ein Gebäude kann durch diese Beschreibung einen Wert zwischen vollständig modernisiert und nicht modernisiert annehmen. Eine Abschätzung des Modernisierungsgrad des deutschen Gebäudebestands konnte Cischinsky durch eine Datenerhebung feststellen.

Letztlich wird in diesem Beitrag das etwaige Baujahr eines Gebäudes verwendet, um den Dämmstandard sowie vermutlich verwendete Baumaterialien abzuschätzen. Diese sind ebenfalls aus dem Zensus 2011 abgeleitet worden. Durch die Charakterisierung des Gebäudebestands anhand der vorgestellten Merkmale in Verbindung mit den vorgeschlagenen Klimazonen kann die Anzahl notwendiger Gebäudesimulationen erheblich verringert werden. Mit Hilfe dieser Zusammenfassung der Gebäude unter Berücksichtigung der Merkmale müssen 3520 repräsentative Gebäudemodelle erstellt und simuliert werden.

Zur Visualisierung der Gebäudebestandsstruktur haben wir in Anlehnung an den Zensus als Darstellungsform Landkarten gewählt, um örtliche Gemeinsamkeiten und Unterschiede in Deutschland feststellen zu können.

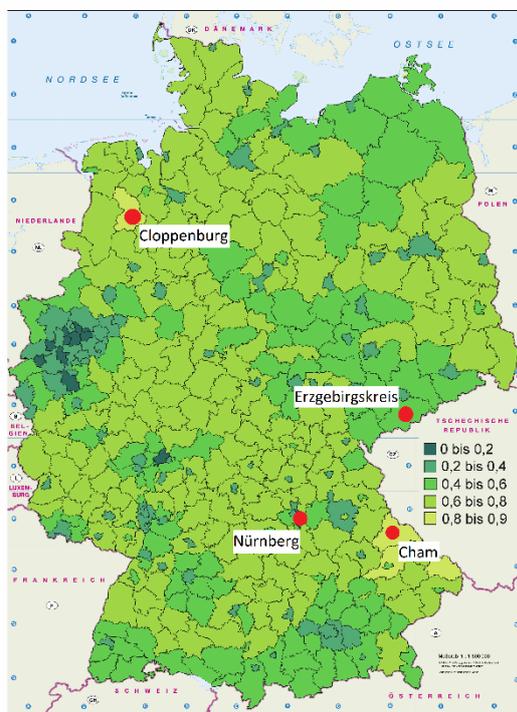


Abbildung 3: Anteil der Einfamilienhäuser am Gesamtbestand in Stadt- und Landkreisen.

In Abbildung 3 ist beispielhaft für die Verteilung der Gebäudebestandsstruktur der Anteil an Einfamilienhäusern in Stadt- und Landkreisen abgebildet. Die Anteile werden zwischen Null und Eins angegeben und sind zur Erhöhung der Übersichtlichkeit in 20 %igen Abstufungen zusammengefasst.

In dieser Landkarte kann beispielsweise das Ruhrgebiet als Ballungsgebiet mit einem geringen Anteil an Einfamilienhäusern nachgewiesen werden. Ähnliche Beobachtungen gelten für definierte Stadtkreise wie Berlin, Hamburg oder Bremen.

Zur Durchführung detaillierter Analysen können einzelne Land- und Stadtkreise zum Vergleich herangezogen werden. Zwei signifikant unterschiedlich aufgebaute Kreise, sind die des Landkreises Cham im Vergleich zum Stadtkreis Nürnberg. Nürnberg liegt in diesem Vergleich etwa 150 km westlich von Cham, daher liegen beide Kreise regional nah beieinander. Beide sind ebenfalls in der Landkarte in Abbildung 4 eingezeichnet.

Charakteristisch für den Landkreis Cham ist mit 84 % der hohe Anteil an Einfamilienhäusern (EFH) im Vergleich zu etwa nur 9 % Reihenhäusern (RH) und 7 % Mehrfamilienhäusern (MFH). Der Anteil an großen Mehrfamilienhäusern (GFH) ist in diesem Landkreis vernachlässigbar gering.

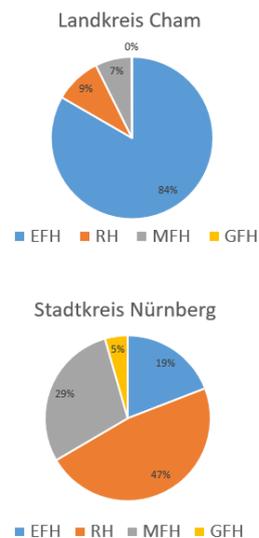


Abbildung 4: Vergleich der Gebäudetypenanteile des Landkreises Cham mit dem Stadtkreis Nürnberg.

Im Vergleich dazu weist der Stadtkreis Nürnberg lediglich 19 % EFH auf, der Anteil an RH vervielfacht sich jedoch auf etwa 47 %. Die übrigen 34 % verteilen sich auf 29 % MFH und 5 % GFH.

Der Unterschied macht deutlich, dass in nicht weit entfernten Kreisen sehr unterschiedliche Strukturen vorliegen, die stark variierende Bedarfe implizieren. Diese Informationen können zur optimalen, bedarfsgerechten Auslegung von Wärmepumpensystemen sehr wertvoll sein, da unterschiedliche Anlagentypen ortsabhängig dimensioniert und betrieben werden können.

Ein weiteres Merkmal zur Analyse des Gebäudebestands ist das Baujahr oder die Baualterklasse. Für einen exemplarischen Vergleich werden in Abbildung 5 der Stadtkreis Cloppenburg im Westen von Deutschland mit dem Erzgebirgskreis im Ostern von Deutschland herangezogen. Beide sind ebenfalls in Abbildung 3 eingezeichnet. Die Baualterklassen sind in unterschiedliche Abstufungen entsprechend der Abbildung 6 segmentiert.

Im Kreis Cloppenburg befinden sich etwa 16.000 Gebäude der Baualterklasse 1949-1978, was einem Anteil von etwa 35 % entspricht. Das beschreibt die Baualterklasse der Nachkriegszeit, in der vornehmlich mit Trümmermaterial gebaut wurde, wodurch diese Baustoffe schlechtere Dämmeigenschaften aufweisen als die der anderen Baualterklassen.

Im Vergleich dazu weisen im Erzgebirgskreis etwa 33 % der Gebäude eine Baualterklasse der Vorkriegszeit auf. Von diesen Gebäuden wurden etwa 25.000 vor 1919 errichtet.

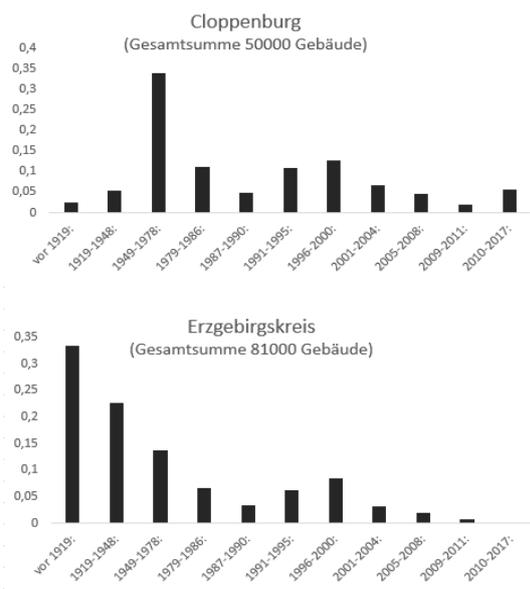


Abbildung 5: Vergleich der Baualtersklassen im Kreis Cloppenburg und dem Erzgebirgskreis.

Die Ergebnisse zeigen auch hier, dass eine Analyse der Gebäudebestandsstruktur einen guten Aufschluss darüber geben kann, inwiefern sich Bedarfe für Wärmepumpensysteme ergeben können. Große Unterschiede in den Baualtersklassen lassen darauf schließen, dass für diese Klassen unterschiedliche Wärmepumpensysteme optimal ausgelegt und betrieben werden müssen. Unter Verwendung dieser Struktur werden Bedarfsberechnungen durchgeführt.

WÄRMEBEDARFSSTRUKTUR

Bedarfsberechnungen erfolgen anhand der Simulation der Modelle unter Berücksichtigung der zuvor vorgestellten Daten. Obwohl eine zu simulierende Datenreduktion von über 99 % durch die statistische Klassifizierung der Gebäude erzielt werden konnte, ist mit 3520 durchzuführender Gebäudesimulationen die absolute Anzahl weiterhin zu hoch, um eine manuelle Durchführung und Auswertung der Simulationen vornehmen zu können.

Daher wird Teaser zur Erstellung von Gebäudemodellen angewandt und mit der vorgeschalteten Parametervariation gekoppelt. In dieser Variation werden die Parameter für die Standorte permutiert und Simulationen entsprechend der voreingestellten Parameter durchgeführt. Wenn aufgrund eines gleichen Standorts beispielsweise ein Parameterpaar wiederholt auftritt, wird auf bereits erzielte Simulationsergebnisse verwiesen und keine neue Simulation durchgeführt. Die einzelnen Berechnungsschritte sind in Abbildung 6 dargestellt.

Die Simulationsmodelle erstellt Teaser in der Sprache Modelica. Die erstellten Modelle werden mit Python in Dymola eingeladen, wo die Simulation durchgeführt werden kann. Als Randbedingungen für Simulationen dienen die standortabhängigen, stündlich aufgelösten Wetterdaten des DWDs.

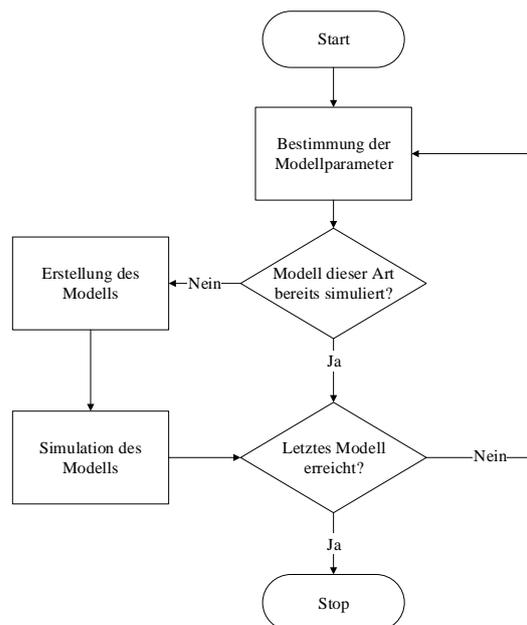


Abbildung 6: Automatisierte Arbeitsabläufe, die zur Simulation des Gebäudebestands ausgeführt werden.

Die Ergebnisse sämtlicher Gebäudesimulationen werden im Rahmen der Arbeit zur Weiterverarbeitung genutzt. Zum einen wird aus jeder Jahressimulation der durchschnittliche Wärmebedarf in kWh/m² bestimmt. Zusätzlich wird der maximale Wärmebedarf in kWh/m² ausgelesen. Letztlich wird der Gesamtwärmebedarf jeder Simulation über ein Jahr integriert und über die ermittelte Häufigkeitsverteilung extrapoliert.

Die Ergebnisse der Gebäudesimulationen sind in Abbildung 7 dargestellt. Mit Hilfe des k-medoids-Clusterverfahrens können die Ergebnisse in fünf typische Cluster zusammengefasst werden. Diese fünf Cluster repräsentieren im Mittel typische durchschnittliche Wärmebedarfe (22.4, 55.6, 81.6, 102.6, 140.6 kWh/m²) mit entsprechenden Ausreißern zu deren korrespondierenden Maxima (90.5, 184.6, 271.0, 335.8, 440.2 kWh/m²). Diese Bedarfe erlauben eine bessere Einschätzung, welche Leistungsklassen Wärmepumpen im Gebäudebestand decken können sollten. Damit können Wärmepumpensysteme bedarfsgerecht ausgelegt werden, wodurch deren Potential zur nachhaltigen Gebäudeversorgung besser ausgeschöpft wird.

Abschließend werden sämtliche Wärmebedarfe der Wärmebedarfsstruktur aufsummiert und um mittlere Trinkwarmwasserbedarfe erweitert. Dabei konnte ein Gesamtbedarf von etwa 2800 PJ ermittelt werden. Im Vergleich zum absoluten Wert, der vom BMWi für 2017 veröffentlicht wurde, überschätzt unsere Berechnung den tatsächlichen Wert um etwa 10 % [BMWi, 2017]. Im Mittel kann daher der Wärmebedarf des deutschen Gebäudebestands mit Hilfe örtlich und zeitlich aufgelöster Gebäudesimulationen abgeschätzt werden.

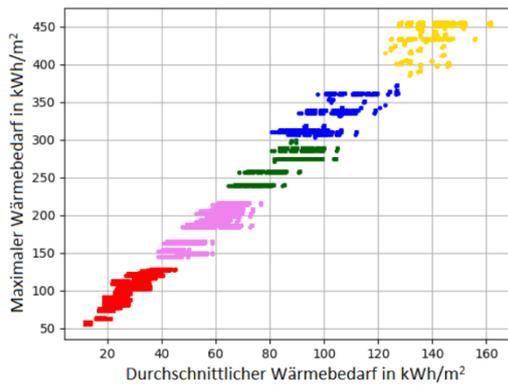


Abbildung 7: Gebäudecluster zur Abbildung des mittleren Gebäudewärmebedarfs in Deutschland.

ERKENNTNISSE DER ARBEIT

Durch die Klassifizierung der Gebäudebestandsstruktur mit anschließenden energetischen Simulationen repräsentativer Wohngebäude konnte der örtlich und zeitlich aufgelöste Wärmebedarf des Gebäudebestands abgeschätzt werden.

Der Vergleich unterschiedlicher Stadt- und Landkreise weist darauf hin, dass eine bedarfsgerechte Auslegung von Wärmepumpensystemen möglich ist. Die erzielten Simulationsergebnisse können aus Sicht der Autoren als Eingangsdaten zur bedarfsgerechten Auslegung von Wärmepumpensystemen verwendet werden, die eine maßgeschneiderte Auslegung dieser Systeme erlauben. In folgenden Untersuchungen sollten tiefgehendere Klassifizierungen zeigen, inwiefern die erzielten 3520 Jahressimulationsergebnisse zur Vereinfachung von Auslegungsverfahren weiter reduziert werden können.

Zusätzlich sollte in folgenden Diskussionen der Kühlbedarf analysiert werden, da dieser in Zukunft zur Erhöhung des Komforts in Gebäuden eine zentralere Rolle einnehmen wird.

DANKSAGUNG

Dieses Vorhaben wird aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) gefördert (EFRE-0500029).

LITERATUR

- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2017, Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland: 1990 bis 2016, 2017.
- Beckman, W. A. et al., 1994, TRNSYS The most complete solar energy system modeling and simulation software, *Renewable Energy* (5), 486-488.
- BMWi, 2018, Energieeffizienz in Zahlen, URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-2018.pdf?__blob=publicationFile&v=12.

- Cischinsky, H., 2016, Datenerhebung Wohngebäudebestand., ISBN-Nr.: 978-3-941140-71-4.
- Deutscher Wetterdienst, 2020. URL <https://www.dwd.de/DE/leistungen/testreferenzjahre/testreferenzjahre.html>.
- DIN EN 12831, 2017. Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Normheizlast.
- DIN EN 15450, 2007. Heizungsanlagen in Gebäuden - Planung von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen.
- Infas360, 2020, URL: <https://infas360.de/infasgeodaten/gebaeuedaten/>
- Institut für Wohnen und Umwelt, 2015. Deutsche Wohngebäudetypologie: Beispielhafte Massnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. IWU, Darmstadt, 2., ISBN 9783941140479.
- Karlsson, F., 2007, Capacity control of residential heat pump heating systems. Göteborg, Chalmers University of Technology, Dissertation.
- Müller et al. 2016,. AixLib – An open-source Modelica library within the IEA-EBC Annex 60 Framework, *BauSIM* 2016, 3–9.
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2015, Endgültige Ergebnisse der Gebäude und Wohnungszaehlung 2011.
- Statistisches Bundesamt, 2018, Bestand an Wohnungen-Fachserie 5 Reihe 3 - 2017.
- Remmen, P. et al., 2016, Teaser: An open tool for urban energy modelling of building stocks. *Journal of Building Performance Simulation*, 11(1):84–98, 2016.
- Tiller, M., 2019, Modelica by example, URL <https://mbe.modelica.university/front/intro/>
- US Department of Energy's, Building Technology Office, 2020, URL: www.energyplus.net.
- VDI 4645, 2018, Heizungsanlagen mit Wärmepumpen in Ein- und Mehrfamilienhäusern.
- Vering, C. et al., 2019, Vergleich der Jahresarbeitszahlen normativ ausgelegter Wärmepumpensysteme – Teil 2, HLH Band 70, Springer-VDI-Verl.
- Vuolle, M. et al., 2003, Will equation-based building simulation make it?-experiences from the introduction of IDA Indoor Climate And Energy, *Proceedings of 8th IBPSA Conference* 2003.

WOHNGEBÄUDE ALS FLEXIBILITÄTSBAUSTEIN IM QUARTIERSVERBUND - ENTWICKLUNG EINES MODELLIERUNGSANSATZES

L. Bogischef¹, M. De-Borja-Torrejon¹ und C. Hemmerle¹

¹TU München, München, Deutschland

KURZFASSUNG

Die thermische Gebäudemasse stellt ein großes Flexibilitätspotenzial für die zukünftige Energieversorgung dar. Als ein Baustein unter weiteren im Quartiersverbund muss für Simulationen eine geeignete Modellrepräsentation gefunden werden. Unterschiedliche Aspekte legen eine detaillierte Untergliederung in Zonen auch bei Gebäuden mit ausschließlicher Wohnnutzung nahe. Der Beitrag stellt die Anforderungen systematisch zusammen und leitet daraus einen Modellierungsansatz ab, welcher auf einer Zonierung in einzelne Wohneinheiten und einem anschließenden Clustering basiert.

ABSTRACT

An enormous flexibility potential for future energy supply systems lies within the thermal building mass. In order to represent it in district energy models, a suitable model has to be found. Various aspects support the need for segmentation of residential buildings into separate thermal zones. A systematic summary of the requirements regarding thermal models in district context is given and the resulting modelling approach is discussed.

EINFÜHRUNG

Der Gebäudebestand ist eine der großen Herausforderungen bei der Dekarbonisierung des Wärmesektors. Einer der Lösungsansätze auf dem Weg zu Energieeffizienz und einer erneuerbaren Versorgung wird in der Vernetzung mehrerer Gebäude gesehen. Die Größenordnung des „Quartiers“ bietet hier eine geeignete Ebene für die Entwicklung von Energieversorgungskonzepten (Zhang et al. 2018; Weißmann 2017). Nicht nur für die interne optimale Auslegung eines solchen Verbunds, sondern auch für die Bereitstellung von Flexibilität an das übergeordnete Energiesystem sind alle multisektoralen Verschiebepotenziale des Verbunds zu erschließen.

Als Definition von Flexibilität eignet sich im vorliegenden Zusammenhang die folgende nach Dall’Anese et al. (2017, S. 43): „[...] *ability of a system to provide secure and economical supply-demand balance across spatial and temporal scales by leveraging and seamlessly coordinating various controllable assets.*“ Dieses Flexibilitätsverständnis geht über eine ausschließliche last- oder erzeugerseitige Anpassung hinaus und setzt die Flexibilität als eine Systemeigenschaft fest, wobei das System im Rahmen dieser Anwendung ein Quartiersverbund sein soll. Diese Größe lässt sich also nur unter Einbezug aller Systemkomponenten bewerten.

Dazu gehören auch die thermischen Lasten von Gebäuden. Neben einer Glättung des Wärmelastprofils kann deren Verschiebung über Power-to-Heat Technologien wie Wärmepumpen auch dem Stromsystem Flexibilität anbieten. Dass durch die Gebäudemasse in Kombination mit einer gewissen Bandbreite für den thermischen Komfort hohe theoretische Flexibilitätspotenziale bestehen, wurde bereits nachgewiesen (Auer et al. 2017). Die hohe Attraktivität dieses funktionalen Speichers liegt darin begründet, dass das Speichermaterial bereits vorhanden ist und damit keinen weiteren Platzbedarf, keine Investitionskosten und negativen Umweltwirkungen für die Herstellung verursacht. Um nun die Lücke von den theoretischen Potenzialen zu einer tatsächlich erzielbaren Wirkung im Energieverbund zu schließen, wird eine entsprechende Repräsentation des thermischen Gebäudeverhaltens benötigt.

Bei der Modellierung des thermischen Gebäudeverhaltens stand bisher nicht die Flexibilität auf Quartiersebene im Vordergrund. Die zum Zweck der Ermittlung des thermischen Gesamtenergiebedarfs übliche Abbildung von Wohngebäuden als Einzonen-Modell erscheint für eine realistische Einschätzung des Flexibilitätspotenzials von Mehrfamilienhäusern

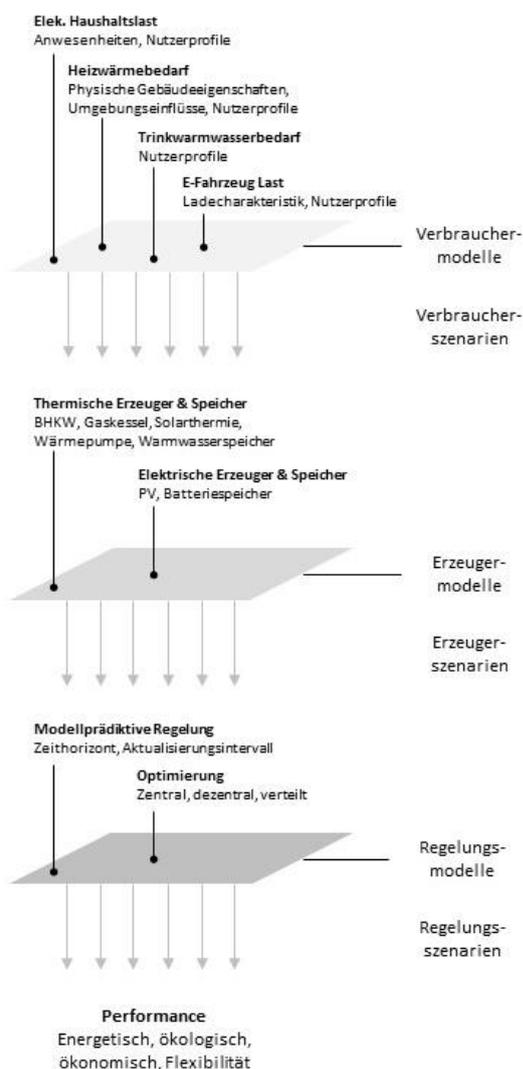


Abbildung 1: Quartiersmodell

unzureichend. Daher wird im Folgenden die Entwicklung eines Modell- und Zonierungsansatzes für diesen Einsatzzweck vorgestellt. Die theoretischen Anforderungen an das Modell werden hierfür aus dem Kontext des übergeordneten Quartiersmodells abgeleitet. Danach erfolgt eine begründete Wahl des Modells zur Repräsentation des Quartiers in zwei Teilschritten. Auf die Entscheidung für ein geeignetes Modell des thermischen Verhaltens einer einzelnen Einheit folgt die Wahl der Zonierung des Quartiers in solche Einheiten. Der resultierende Ansatz wird mit einem Fokus auf Wohngebäude erläutert.

MODELLENTWICKLUNG

Das übergeordnete Quartiersmodell ist der Rahmen, in dem das Modell für das thermische Gebäudeverhalten zum Einsatz kommen soll und daher auch der Ausgangspunkt für die Ermittlung der Anforderungen. Die weiteren Schritte der Modellentwicklung basieren hierauf und daher soll zunächst ein Überblick über das Quartiersmodell gegeben werden.

Quartiersmodell

Der Gesamtworkflow des Quartiersmodells wurde im Rahmen des Projekts Cleanvelope entwickelt (Bogischef et al. 2019). Dieser lässt sich in die drei Bereiche Verbraucher, Erzeuger und Optimierung gliedern (Abb.1).

Neben den thermischen Lasten liegen auf der Verbraucherebene wegen der Sektorkopplungsmöglichkeiten auch elektrische Lasten, die aus konventionellen Haushaltsstromlasten sowie Lasten durch das Laden von Elektrofahrzeugen bestehen.

Auf der Erzeugerebene befinden sich Modelle für wärme- und stromerzeugende Komponenten, um die Simulation unterschiedlicher Erzeugungskonzepte zu ermöglichen. Auch wenn mit Quartiersenergiekonzepten in der Regel eine hohe Versorgung aus lokalen erneuerbaren Quellen angestrebt wird, soll keine autarke Situation abgebildet werden. Vielmehr soll das Modell perspektivisch auch netzdienliche Interaktionen mit dem Energiesystem erfassen. Auf dieser Modellebene wird daher auch die Anbindung an die übergeordnete Energieinfrastruktur dargestellt. Außerdem werden hier Speicherelemente berücksichtigt, wobei anzumerken ist, dass auch Elemente der Verbraucherebene als funktionale Speicher dienen können. Eine separate Modellkomponente für elektrische oder thermische Netze wird nicht erstellt, weil eine reduzierte Betrachtung im Sinne einer bilanziellen Bedarfsdeckung im Quartier erfolgen soll.

Die letzte Ebene dient einer Optimierung des Gesamtverbunds, wobei beispielsweise auch modellprädiktive Regelungsansätze untersucht werden sollen. Es werden sowohl eine zentrale Optimierung als auch verteilte Optimierungsstrategien berücksichtigt. Da die Optimierung auf eine Einsatzoptimierung und nicht auf eine Kapazitätsplanung abzielt, wird ein Zeithorizont von wenigen Tagen gewählt.

Die kombinierte Betrachtung mit den Erzeugerkomponenten und anderen Verbrauchern ist wichtig, um Flexibilitätskennwerte für den gesamten Verbund zu erhalten. Die separat betrachteten Lastmanagementpotenziale werden hierdurch durch Leistungsgrenzen der Erzeuger und weitere Anforderungen im Betrieb eingeschränkt und damit näher an ein realistisches Potenzial herangeführt. Insbesondere lassen sich dezentrale und quartierszentrale Versorgungskonzepte nach der neuen Kenngröße der Flexibilität gegeneinander vergleichen.

Dieser Gesamtworkflow zielt auf eine Untersuchung von vielfältigen Randbedingungen ab. Im vorliegenden Fall werden auf jeder Modellebene Szenarien gebildet, die beliebig mit den Szenarien anderer Ebenen kombiniert werden können. Hierin liegt ein wesentlicher Unterschied zu Modellstrukturen, die zwar realistischere Ergebnisse liefern, aber nur auf wenige exemplarische Fälle angewendet werden sollen, weil der Modellierungs- und Simulationsaufwand sonst nicht angemessen wäre. Als Ergebnis der Simulationen werden wirtschaftliche und ökologische Kennwerte sowie Kennwerte zur Flexibilität ausgegeben.

Da die Variablen der thermischen Modellinstanzen in die quartiersweite Optimierung einbezogen werden, erhöht sich mit der Menge an Variablen auch die Rechenzeit für einen Optimierungsdurchlauf. Die Zahl an einzeln modellierten thermischen Zonen ist also möglichst gering zu halten. Um außerdem ein konsistentes Quartiersmodell zu gewährleisten, ist eine gemeinsame Datenbasis für verschiedene Modellkomponenten zu hinterlegen. Beispielsweise benötigt die Energieerzeugungskomponente für Solaranlagen gemeinsame Inputs mit den thermischen Gebäudemodellen, weil die Installationsflächen an Fassade und Dach den Flächen des thermischen Modells entsprechen. Um nun die Doppelung von Zuweisungsschritten – vor allem zur Vermeidung von Inkonsistenz – gering zu halten, sind die Instanzen von Modellkomponenten mit Inputüberschneidungen auf einem möglichst langen gemeinsamen Workflow aufzubauen. Diese Zielsetzung kann auch die Anforderung einer Anpassung der Struktur des thermischen Quartiersmodells erfordern.

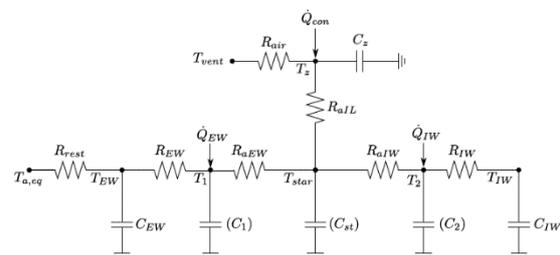
Verbrauchermodell Gebäude (Heizwärmebedarf)

Vor dem Hintergrund dieser Anforderungen kann nun ein Modellierungsansatz für das thermische Gebäudeverhalten entwickelt werden. Im Quartierszusammenhang sind zwei Teilfragestellungen zu berücksichtigen: zum einen wie das Quartier in einzelne Modelleinheiten zerlegt wird und wieviel Abstraktion in diesem Schritt erfolgen soll; zum anderen welches Modell für die Berechnung des thermischen Verhaltens dieser einzelnen Einheiten gewählt wird. Besonders wenn der Anwendungsfokus auf dem Verschiebepotenzial durch die thermische Gebäudemasse liegt, ist die Gratwanderung zwischen einer ausreichend detaillierten dynamischen Antwort einzelner Einheiten und der Vereinfachung für ein Abbild des gesamten Quartiers zu absolvieren.

Modellauswahl thermisches Gebäudeverhalten

Modelle für das thermische Gebäudeverhalten lassen sich in physikalische, reduzierte und datenbasierte Modelle unterteilen. Letztere weisen nach Hong et al. (2020) die Schwierigkeit auf, dass ausreichende

Trainingsdaten für die Modellerstellung zur Verfügung stehen müssen und die Modelle nur unter denselben Randbedingungen gültig sind. Physikalische Modelle bilden zwar die physikalischen Prozesse am detailliertesten nach, benötigen dafür aber auch eine entsprechende Rechenzeit und werden daher als zu aufwendig für Quartiere angesehen (Lauster 2018). Thermische-Netzwerk-Modelle, auch als Resistance-Capacitance-Modelle (RC-Modelle) bezeichnet, gehören zu den reduzierten Modellen und können je nach Modellausprägung den white- oder grey-box Modellen zugerechnet werden. Sie bilden einen geeigneten Ansatz für die Größenordnung des Quartiers, weil sie verhältnismäßig wenig Rechenaufwand mit einer physikalischen Interpretation der Parameter verbinden und sich für Optimierungsmodelle mit modellprädiktiven Ansätzen anbieten. Für eine bestmögliche Ausschöpfung von Flexibilität unter Vorhersage zukünftiger Entwicklungen werden solche Regelungsstrategien bevorzugt angewendet. RC-Modelle stellen also in diesem Zusammenhang einen geeigneten Ansatz dar, werden aber in Forschungsarbeiten in vielfältigen topologischen Modellausprägungen herangezogen. Auf der Basis einer umfangreichen Gegenüberstellung von RC-Modellen unterschiedlicher Ordnung empfiehlt Lauster (2018) Modelle 2. Ordnung. Dies entspricht auch dem Modell nach VDI 6007-1 2015.



C	Kapazität	air	Luft
\dot{Q}	Wärmestrom	a, eq	Außenluft, äquivalent
R	Wärmedurchgangswiderstand	aEW	Stern - Außenwände
T	Temperatur	aLL	Stern - Lüftung
		aIW	Stern - Innenwände
		con	konvektiv
		EW	Außenwände und nicht adiabate Innenbauteile
		IW	Innenwände
		rest	Rest
		star	Sternposition
		vent	Ventilation
		z	Zone

Abbildung 2: RC-Modell einer thermischen Zone. Kapazitäten mit einem vernachlässigbar kleinen Wert in Klammern.

Zonierung im Quartier

Für die Quartiersebene stellt sich weiterhin die Frage, wie die Zerlegung in Zonen vorzunehmen ist, die als voneinander unabhängige Modelle abgebildet werden können und welche davon vereinfachend zusammengefasst werden können. Dass die Zonierungsregeln erheblichen Einfluss auf die jährlichen Energiebedarfe haben, wird in einer Studie von Chen & Hong (2018) nachgewiesen. Unabhängig von dem gewählten RC-Ansatz, werden diese Fragen auch auf dem Forschungsfeld von *Urban Building Energy Modelling* behandelt. Hier wird unter anderem versucht, die auf das Einzelgebäude bezogenen Zonierungskriterien um den Umgebungskontext zu erweitern. Der „Shooboxer“-Algorithmus von Dogan & Reinhart (2017) beispielsweise basiert auf der Zonierungsregel nach ASHRAE mit Kern- und Randzone pro Fassadenrichtung, führt aber weitere Schritte zur Berücksichtigung der einfallenden Solarstrahlung aus. Im Anschluss wird ein Clustering vorgenommen und eine repräsentative „Shoobox“-Einheit pro Fassadenrichtung und Gebäude gewählt.

Unter der Flexibilitätszielsetzung kann ein analoges Vorgehen sinnvoll sein, muss aber zusätzlich die Rolle des Nutzers einbeziehen.

Im Folgenden werden die Aspekte „Umgebungskontext“ und „Nutzerverhalten“ zwar für eine Abbildung durch ein RC-Modell ähnlich dem in VDI 6007-1 2015 (siehe Abb.2) erläutert, sind aber auf andere thermische Modelle übertragbar. Die beiden Aspekte beziehen sich auf die Inputdaten im Sinne von Aktionsgrößen nach VDI 6007-1 2015. Bei stark abweichenden Inputdaten führt die Zusammenfassung zu einer Zone zu ausgleichenden Effekten und damit zu einer Verzerrung der thermischen Zustände

Berücksichtigung des Umgebungskontexts

Ein detaillierter Umgebungskontext lässt eine Differenzierung der Umwelteinflüsse zu, die über eine Unterscheidung nach der Orientierung für Solarstrahlungseinträge hinausreicht. Wesentliche Einflussfaktoren sind die Verschattung, die Reflexion von kurzweiliger Strahlung, langweiliger Strahlungsaustausch und auch das Mikroklima. In das RC-Modell (Abb.2) fließen diese Faktoren über die äquivalente Außentemperatur ($T_{a,eq}$) und die Strahlungsgewinne (enthalten in den Wärmeeinträgen in die Innenbauteile Q_{IW} sowie die Außenbauteile Q_{EW}) ein. Im Quartierskontext und gerade bei größeren Gebäuden können sich die Umgebungswerte je nach Position am Gebäude stark unterscheiden. Das Erdgeschoss wird beispielsweise im Vergleich zu den oberen Geschossen deutlich häufiger von umliegender Bebauung verschattet. Eine detailliertere Berücksichtigung des Umgebungskontexts führt zu Mehraufwand in der Modellierung. Demgegenüber steht aber gerade im Rahmen eines

Quartiersgesamtmodells ein Gewinn an Genauigkeit an mehreren Stellen, wenn eine Mehrfachverwendung in unterschiedlichen Komponenten möglich ist.

Berücksichtigung des Nutzerverhaltens

Bei der Betrachtung des thermischen Nutzenergiebedarfs als flexible Last spielt das Nutzerverhalten eine tragende Rolle. Die Flexibilität kommt erst durch die Verbindung von Speicherkapazität in Form der Bauteile und einer Bandbreite an vom Nutzer akzeptierten Raumtemperaturen zustande. In dem RC-Modell wird der Einfluss der Nutzer über die gewünschte Raumtemperatur T_z abgebildet (Abb.2). Im Gegensatz zu einer einheitlichen Annahme eines festen zulässigen Schwankungsbereichs für alle Bewohner erlaubt die Möglichkeit einer differenzierten Eingabe von Nutzerwünschen weitergehende Untersuchungen zum Einfluss von vielfältigen Komfortansprüchen und Beteiligungsraten. Hierfür ist auch eine Unterscheidung in Anwesenheits- und Abwesenheitszeiten sinnvoll, da die Nutzerakzeptanz für Temperaturschwankungen bei Abwesenheit wesentlich abweichen könnte. In diesem Zusammenhang muss aber zwingend auf die Verfügbarkeit entsprechender Daten und deren Auflösung eingegangen werden. Ohne die notwendige Datenbasis bleibt der Nutzen auf einem theoretischen Level.

Resultierender Modellierungsansatz

Aus den genannten Teilaspekten erschließt sich, dass die Repräsentation eines Gebäudes als eine Zone im Quartierskontext zwar den Vorteil einer Reduktion auf nur eine Modellinstanz pro Gebäude aufweist (eine einheitliche Nutzung als z.B. Wohngebäude vorausgesetzt), aber wesentliche Aspekte zur realistischen Beurteilung der Flexibilität vernachlässigt. Vor allem die Hinwendung zu einem Betrachtungsraum, der mit einer Nutzereinheit übereinstimmt, war bisher kein Zonierungsaspekt. Ein Zonierungsansatz, der allen vorgenannten Anforderungen gerecht wird, ist für Wohngebäude eine Zonierung nach Wohnungsgrundrissen. Dieser Ansatz wurde in Hausladen et al. (2014) bei der Untersuchung von Lastverhalten von Gebäudetypen unterschiedlicher Bauweisen als Kompromiss zwischen Genauigkeit und Simulationsaufwand für die Übertragbarkeit der Ergebnisse angenommen. Mit diesem Ansatz wird im Quartierskontext sowohl eine vertikale Untergliederung nach Stockwerken erreicht, als auch eine weitere Zerlegung in horizontaler Richtung, sodass ein verhältnismäßig kleinteiliges Raster für die Berücksichtigung der Umwelteinflüsse entsteht. Beispielsweise gegenüber dem Verfahren im ASHRAE ANSI/ASHRAE Standard 90.1-2013, wo eine rein geometrische Grundrisszerlegung in eine Kernzone und Randzonen pro Fassadenrichtung

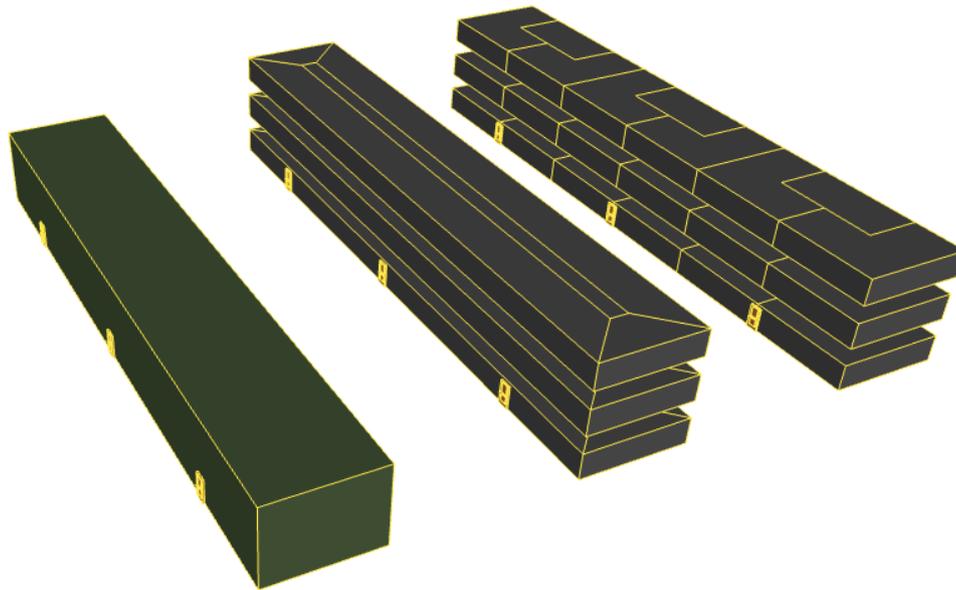


Abbildung 3: Unterschiedliche Zonierungsansätze für Mehrfamiliengebäude. Links: Einzoner. Mitte: Zonierung in Rand- und Kernbereiche. Rechts: Zonierung nach typischen Wohnungsgrundrissen.

erfolgt, hat dies den Vorteil, dass die Änderung von Umwelteinflüssen entlang der Gebäudelänge wiedergegeben werden kann und die Zuordnung von Nutzern und deren Präferenzen ihrem Wirkungsbereich entspricht. Voraussetzung hierbei ist wieder die Datenlage. Zwar sind die Wohnungsgrundrisse nicht flächendeckend öffentlich verfügbar, aber da die Einteilungen gewissen Regelmäßigkeiten unterworfen sind, finden sich bei Kenntnis des Gebäudetyps und der Baualtersklasse Informationen zu häufigen Wohnungsgrundrissen in der Literatur. Da sich bei der Annahme von geschlossenen Türen auch eine Wohnung in einzelne thermische Zonen nach Räumen gliedern lässt, ist die Frage nach einer solchen Zonierung wegen des höheren Detaillierungsgrads gerechtfertigt. Dagegen spricht die wesentlich ungenauere Kenntnis über die Raumeinteilung sowie die Anwesenheit der Nutzer innerhalb welchen Raums und den Luftwechsel zwischen den Zonen bei geöffneten Türen. Dazu wäre außerdem ein wesentlich größerer Modellierungsaufwand aufgrund einer komplexeren Darstellung zu betreiben. Die Orientierung an Wohnungsgrößen stellt bei der Zonierung also einen Kompromiss dar zwischen Exaktheit des thermischen Verhaltens und Informationsverfügbarkeit sowie Modellierungsaufwand. Die angesprochenen Zonierungsansätze werden in Abbildung 3 veranschaulicht.

Die aus einem solchen Vorgehen resultierenden Zonen werden dann als voneinander unabhängige RC-Modellinstanzen in das Quartiersmodell eingebunden, was auf der Grundannahme basiert, dass keine Wärmeflüsse zwischen den Zonen auftreten. Da die Ausnutzung von Temperaturkomfortbändern eine

Zielsetzung darstellt und die Möglichkeit von unterschiedlichen Innenraumtemperaturen einzelner Nutzereinheiten explizit eingeräumt wird, sollte eine Plausibilisierung dieser Annahme erfolgen. Da allerdings von einer Toleranzspanne von nur wenigen Kelvin und kurzen Verschiebedauern auszugehen ist, ist ein geringer Einfluss dieser Vereinfachung auf das Ergebnis zu erwarten. Diese These gilt es, mit gesicherten Erkenntnissen zu hinterlegen.

Im Ergebnis werden somit größere Wohngebäude über eine Anzahl an RC-Modellen repräsentiert, die der Anzahl an Wohnungen entspricht. Im Vergleich zu der Ein-Zonen-Betrachtung eines Gebäudes wird die Anzahl an Variablen für die Optimierung damit deutlich erhöht. Um dem entgegenzuwirken bieten sich Clustermethoden an. Statt eine Vereinheitlichung der Zonen an der Lage innerhalb desselben Gebäudes festzumachen können unterschiedliche Kriterien wie z.B. die jährliche Einstrahlung und Anwesenheitsprofile herangezogen werden. Neben den Kriterien für die Clusterbildung muss auch die Clustergröße festgelegt werden. Durch diese Faktoren besteht bei der Clusterbildung eine große Bandbreite an Detaillierungstiefe. Hier sind die Abweichungen in Hinblick auf die Genauigkeit gegenüber der Erhöhung der Rechengeschwindigkeit abzuwägen.

DISKUSSION

Das vorgestellte Modell erweitert bisherige Ansätze zur Modellierung des thermischen Gebäudeverhaltens im Forschungsfeld von *Urban Building Energy Modelling* um eine differenzierte Zonierung insbesondere von Wohngebäuden. Diese wird als notwendig erachtet, um die Nutzungspotenziale der thermischen Gebäudemasse als Flexibilitätsbaustein in Quartiersenergieverbänden aufzuzeigen.

Der Modellansatz basiert auf einer argumentativen Herleitung und daher sind im nächsten Schritt simulationsbasierte Nachweise zu führen. Als Kriterien für eine Eignung für den vorliegenden Einsatzzweck sind vor allem die Unterschiede in der Simulationszeit und der Ergebnisqualität der Flexibilitätskennwerte gegenüber anderen Modellansätzen heranzuziehen.

Für die Umsetzung des Ansatzes ist außerdem eine detailliertere Vorgehensweise auszuarbeiten, wie die Zerlegung in Wohnungseinheiten erfolgt. Wenn typologische Werte für die Grundrisszerlegung herangezogen werden, aber eine Vielzahl an realen Grundrissausprägungen damit belegt werden soll, entsteht die Schwierigkeit, wie die Zerlegung jeweils angepasst wird. Ein Algorithmus, der alle Anwendungsfälle abdeckt, kann hier dem Vorwurf einer Willkürlichkeit vorbeugen und gleichzeitig ein Mittel sein, um die Sensibilität der Ergebnisse auf eine Änderung des Verfahrens aufzuzeigen. Daneben ist eine typologische Herangehensweise auch von der Verfügbarkeit repräsentativer Datengrundlagen abhängig.

Zuletzt sind diese Herausforderungen aber den Anwendungspotenzialen gegenüberzustellen. Der Hauptanwendungszweck, eine Untersuchung von Flexibilität auf Quartierebene, lässt sich um weitere Anwendungszwecke ergänzen. Der Einfluss einzelner Modellparameter kann im Quartierszusammenhang in unterschiedlichen Szenarien analysiert werden und somit deren Relevanz eingeordnet werden. Die Umgebungseinflüsse und das Nutzerverhalten seien hier nur beispielhaft genannt.

ZUSAMMENFASSUNG

Flexibilitätsbetrachtungen auf Quartiersverbundebene stellen neue Anforderungen an die thermische Modellierung von Gebäuden, wenn auch die Lastverschiebemöglichkeit durch die Gebäudemasse berücksichtigt werden soll. Die Anforderungen ergeben sich einerseits aus dem übergeordneten Quartiersmodellkontext, in den diese Komponente integriert werden soll, und andererseits aus einer differenzierteren Zonierung zur Ermittlung der Verschiebepotenziale. RC-Modelle werden als geeignete Abbildung identifiziert. Bei der Frage nach dem Zerlegungsverfahren des Quartiers in einzelne solcher Modellinstanzen wird eine Berücksichtigung des Umgebungskontexts und der Nutzerrolle als notwendig und vielversprechend erachtet. Für Wohngebäude wird eine Zerlegung nach typischen Wohnungsgrundrissen in Kombination mit einem anschließenden Clustering vorgeschlagen. Da dieser Ansatz auf theoretischen Überlegungen basiert, sind im nächsten Schritt quantitative Nachweise zu führen.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken dem Bayerischen Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst für die Förderung des Projekts Cleanvelope im Rahmen des Bayerischen Klimaforschungsnetzwerks.

LITERATUR

- ASHRAE ANSI/ASHRAE Standard 90.1-2013: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. Atlanta, GA.
- Auer, T., Hamacher, T., Wagner, U., Atabay, D., De-Borja-Torrejón, M., Dornmair, R. et al. 2017: Gebäude als intelligenter Baustein im Energiesystem. Lastmanagement-Potenziale von Gebäuden im Kontext der zukünftigen Energieversorgungsstruktur in Deutschland: Abschlussbericht. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Bogischef, L., De-Borja-Torrejón, M., Fassbender, E., Jambagi, A., Hemmerle, C. 2019: Solar activated envelopes in district context – energy modelling tasks. In: Thomas Hamacher (Hg.): Shaping a Sustainable Energy Future. 9th Colloquium of the Munich School of Engineering. Garching, 01.08.2019, S. 16.
- Chen, Y., Hong, T. 2018: Impacts of building geometry modeling methods on the simulation results of urban building energy models. In: Applied Energy 215, S. 717–735.
- Dall'Anese, E., Mancarella, P., Monti, A. 2017: Unlocking Flexibility: Integrated Optimization and Control of Multienergy Systems. In: IEEE Power and Energy Mag. 15 (1), S. 43–52.
- Dogan, T., Reinhart, C. 2017: Shoeboxer: An algorithm for abstracted rapid multi-zone urban building energy model generation and simulation. In: Energy and Buildings 140, S. 140–153.
- Hausladen, G., Auer, T., Schneegans, J., Klimke, K., Riemer, H., Trojer, B., Quian, L., de-Borja-Torrejón, M. 2014: Lastverhalten von Gebäuden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bauweisen und technischer Systeme. Speicher- und Lastmanagementpotenziale in Gebäuden (Technische Universität München Ed.). Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Hong, T., Chen, Y., Luo, X., Luo, N., Lee, S.H. 2020: Ten questions on urban building energy modeling. In: Building and Environment 168, S. 106508.

- Lauster, M. 2018: Parametrierbare Gebäudemodelle für dynamische Energiebedarfsrechnungen von Stadtquartieren. Dissertation. Universitätsbibliothek der RWTH Aachen, Aachen.
- VDI 6007-1 2015: Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden - Raummodell.
- Weißmann, C. 2017: Effizienter Einsatz erneuerbarer Energieträger in vernetzten Wohnquartieren. Entwicklung eines simulationsbasierten Verfahrens zur energetischen, ökologischen und ökonomischen Bewertung. Dissertation. Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt, Heft 37.
- Zhang, X., Lovati, M., Vigna, I., Widén, J., Han, M., Gal, C., Feng, T. 2018: A review of urban energy systems at building cluster level incorporating renewable-energy-source (RES) envelope solutions. In: Applied Energy 230, S. 1034–1056.

EIN ONLINE-TOOL ZUR ERPROBUNG BEZAHLBARER HANDLUNGSOPTIONEN FÜR ENERGIEEFFIZIENZ IM LÄNDLICHEN RAUM

U. Cämmerer-Seibel¹, G. Kiesel¹, C. Völker¹ und D. Cebulla²

¹Professur Bauphysik, Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, Deutschland

²Jena-Geos, Jena, Deutschland

KURZFASSUNG/ABSTRACT

Im ländlichen Raum sind kaum Vorarbeiten mit dem Ziel eines übergreifenden Wärme- und Energiekonzeptes vorhanden. Kleinen Gemeinden fehlen meist die Kompetenz und finanzielle Mittel, um aus eigener Kraft die komplexen Prozesse in Zusammenhang mit der Energiewende aktiv angehen zu können. Politische Entscheidungsprozesse sowie unklare Finanzierungsstrukturen bremsen die Einbettung von Energiestrategien in die lokale Wirtschaftsentwicklung. Aus diesen Gründen wurde im Verbundforschungsprojekt „TRAIL“ ein Online-Tool für kleine Gemeinden entwickelt, das basierend auf freien Geo- und Statistikdaten den Strom- und Wärmebedarf visualisiert. Um die Hürden möglichst gering zu halten, werden nur ein aktueller Internetbrowser und einen Internetzugang für die Nutzung benötigt.

In rural areas there is hardly any expertise in an overall energy transition process. Small communities generally lack the skills and financial resources to actively tackle the complex processes associated with energy transition. Political decision-making processes and unclear financing structures slow down the embedding of energy strategies in local economic development. In a collaborative research project “TRAIL”, an online tool was developed to visualize the electricity and heat demand using free geographic and statistical data. To keep the hurdles as low as possible, only a current browser is required for use.

EINFÜHRUNG

Im November 2019 hat der Deutsche Bundestag das Bundes-Klimaschutzgesetz (Bundesregierung 2019) beschlossen. Dieses Gesetz schreibt erstmals das Klimaschutzziel fest, die Treibhausgasemissionen um mindestens 55% bis 2030 gegenüber 1990 zu vermindern. Darüber hinaus wird in diesem Gesetz das Bekenntnis formuliert, bis zum Jahr 2050 für Deutschland die Treibhausgasneutralität zu erreichen. Dafür müssen unter anderem Instrumente und Methoden entwickelt werden, die auch kleineren Kommunen helfen, klima- und energiepolitischen Fragestellungen nachhaltig zu beantworten. Fehlinvestitionen, zum Beispiel in fossile Energien und Strukturen oder veraltete Systeme, sind zu vermeiden und alle handelnden Akteure vor Ort, von der Verwaltung über die Wirtschaft sowie

verschiedenen Interessengruppen bis hin zu Privatpersonen in diese Prozesse intensiver einzubinden (Sperling et al. 2011).

Im städtischen Maßstab funktioniert dieser komplexe Prozess bereits recht gut, jedoch gibt es, insbesondere bei Mitwirkung mehrerer Stakeholder, eine Reihe von Hindernissen, die es zu überwinden gilt. Auf kommunaler Ebene wird die Komplexität des Themas, insbesondere durch die Anzahl und Diversität der handelnden Akteure, unterschiedliche Betrachtungsskalen, Verknüpfungen und Unsicherheiten in Prozess, Methoden und grundlegenden Definitionen besonders deutlich (Cajot et al. 2017). Viele Studien haben sich mit dem Thema Energieplanung und Energieeffizienz im städtischen Maßstab befasst (Zanon und Verones 2013) und argumentieren, dass Energieeffizienz "durch die Verbindung der Gebäudeskala mit der städtischen angegangen werden muss".

Die Zuständigkeit für die Energieplanung hat sich von einer begrenzten Gruppe von Spezialisten, einschließlich Behörden und Verwaltung auf verschiedenen Ebenen, auf betroffene Unternehmen und Anlagenbetreiber sowie viele weiteren Akteuren erweitert. Die führende Rolle der Kommunen als zentrale Organisationseinheit für die Energiewende und Energieplanung (Sperling et al. 2011) wird deshalb immer bedeutungsvoller.

Die besonderen Herausforderungen zum Einstieg in die Energiewende auf kommunaler Ebene – insbesondere im ländlichen Raum - sind in der oft hohen technischen Komplexität (Kirnats et al. 2018), politisch komplexen Entscheidungen und unklaren Finanzierungsstrukturen begründet. Planungen erfordern in der Regel ein hohes Fachwissen und erhebliche Ressourcen in Bezug auf Kosten, Zeit und Personal.

Fast alle Forschungsvorhaben zur Energiewende im urbanen Raum beziehen sich ausschließlich auf städtische Gebiete und sind mit Smart-City-Initiativen verbunden. Langsam steigt der Fokus jedoch auch auf ländliche Gebiete, wie die Diskussion um "intelligente Dörfer" (Poggi et al. 2018) zeigt. Das ist nicht verwunderlich, denn 90 Prozent der Fläche der EU sind ländlich oder überwiegend ländlich geprägt und etwas mehr als die Hälfte der europäischen Bevölkerung lebt in Gegenden, die unter diese Definition fallen (Eurostat regional yearbook 2019).

Deshalb beschreibt die OECD (2012) die Erfordernis zur Verknüpfung der Potenziale erneuerbarer Energien mit der ländlichen Entwicklung. Daher sollten auch Schlüsselfaktoren, wie z.B. die Integration von neuen Energiestrategien in die jeweilige lokale Wirtschaftsentwicklung betrachtet werden. Diese Potenziale sind, bis auf wenige Leuchtturmprojekte, die meist von privaten Initiativen initiiert werden (Pfenning (2018), Becker und Naumann (2016)), bisher nur in geringem Maße ausgeschöpft.

Mit der Entwicklung kommunaler Energiepläne wird in Kommunen jeweils die Grundlage für die Analyse und Steigerung der Energieeffizienz gelegt. Energie(verbrauchs/bedarfs)-datenbanken im kommunalen und stadtplanerischen Kontext stützen sich in der Regel auf Daten, die mit geographischen Informationssystemen (GIS) gesammelt, visualisiert und entwickelt werden, um die erforderlichen Informationen für die Erstellung von Energieplanungen bereitzustellen (Ascione et al. 2013).

Für den ländlichen Raum wurde dieses Verfahren jedoch bisher nicht umgesetzt, da es in einem frühen Planungsstadium oft qualitativ hochwertige Energiedaten und hohe Investitionen in Fachwissen benötigt. Selbst frei zugängliche Online-Tools, die dem ländlichen Raum mit sofort verfügbaren Ergebnissen und Empfehlungen in frühen strategischen Planungsphasen helfen könnten, existieren nicht (Benedek et al. 2018).

Geographische Informationssysteme (GIS) wurden als Werkzeuge für die stadtenergetische Planung in verschiedenen Forschungen ((Byrne et al. 2008), (Ascione et al. 2013), (Bugs et al. 2010)), hauptsächlich als Instrument für Energieaudits von Gebäuden genutzt. Sie ermöglichen, Informationen über urbane Zusammenhänge in verschiedenen Ebenen für Energieanalysen, Forschungen und Planungen zu sammeln (Ascione et al. 2013). und – je nach Verwendungszweck – gefilterte Informationen zusammenzustellen.

Alle derzeit verfügbaren GIS-basierten Lösungen (vgl. z.B. (HOTMAPS 2018) oder (ECOSPEED AG 2018)) haben grundsätzlich andere Herangehensweisen, sind kosten- und personalintensiv und konzentrieren sich hauptsächlich auf städtische Gebiete. Eine Auswertung von 900 deutschen Energieforschungsprojekten von (Kirnats et al. 2018) zeigte zudem, dass diese Forschungsprojekte in den meisten Fällen keine breite Praxisanwendung finden. Vor allem fehlen systematische Ansätze zur ganzheitlichen Modellierung des Gesamtsystems unter Einbeziehung aktiver Nutzer und integrierter Energiesysteme (Kirnats et al. 2018).

Methodik

Der Ansatz der Autoren, der auf eben diesen Herausforderungen zur Umsetzung der zukünftigen Energieplanungen im ländlichen Raum basiert, wurde

als Aufgabenstellung für das Projekt TRAIL (TRANSformation Im Ländlichen Raum 2017-2019, www.trail-energie.de) definiert. Das Forschungsprojekt wurde von sechs Partnern aus Wissenschaft und Praxis initiiert und umgesetzt. Gerade die Kombination von theoretischem und praktischem Know-how war wichtig, um ein Entscheidungs-Unterstützungs-Tool für lokale Nutzer und Entscheidungsträger auf Gemeindeebene zu entwickeln und zu realisieren. Ziel war es, kleine Kommunen mit weniger als 10.000 Einwohnern in die Lage zu versetzen, erste Schritte auf dem Weg hin zu mehr und besserer Energieeffizienz ohne überbordenden personellen und finanziellen Aufwand zu wagen und dabei die Hürden für den Einstieg in dieses Thema so niedrig wie möglich zu gestalten.

Vier typische ländliche Kommunen (die Stadt Kahla mit ca. 6.900, die Gemeinden Werther mit ca. 3.200, Großbrömmen mit ca. 900 und Neumark mit nur ca. 500 Einwohnern) im Bundesland Thüringen beteiligten sich an dem Projekt, um aus ihrer Sicht notwendige Anforderungen an ein derartiges Hilfsmittel zu formulieren, die jeweiligen Entwicklungsstände zu testen, Nutzungserfahrungen einzubringen und das TRAIL Online-Tool kontinuierlich zu bewerten.

Das TRAIL-Tool wird in drei Versionen (TRAILstarter, TRAILplus und TRAILpro) entwickelt, ein Ansatz, um auf die unterschiedliche Anspruchsniveaus der Gemeinden zu reagieren. TRAILstarter beinhaltet kartographisch aufbereitete Informationen zum Wärme- und Strombedarf für Wohngebäude innerhalb einer Gemeinde. Diese werden aufgrund von Kennzahlen überschlägig berechnet und auf Basis der räumlichen Verfügbarkeit der Datengrundlage in einem 100x100m-Gitternetz dargestellt (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (2017)). Den Rasterzellen sind statistische Daten der Gemeinden und öffentlich zugängliche Daten (GIS, Zensus) zugeordnet. Anhand dieser Zuordnung kann die Verteilung des Wärme- und Strombedarfs beurteilt und visualisiert werden. Je nach lokaler Verteilung lassen sich Präferenzräume zur weiteren Betrachtung ermitteln. Die Versionen TRAILplus und TRAILpro sind noch in der Entwicklung und werden an dieser Stelle nicht vertieft.

Alle Datenverarbeitungsalgorithmen sind in der Programmiersprache R (R Team (2017)). geschrieben. Die folgenden Pakete wurden dazu verwendet: *sf* (Pebesma 2018b), *rgdal*, *lwgeom* (Pebesma 2018a), *spdep* (Bivand et al. 2013) und *raster* (Hijmans 2017). Der Datenverarbeitungsansatz ist in TRAILstarter implementiert und seine Teilschritte werden anschließend erläutert. Die Vorteile des gewählten Ansatzes sind, dass keine Datenerhebung durch die Gemeinde erforderlich ist und die Ergebnisse direkt verfügbar sind.

Die durch das TRAIL-Tool verwendeten Wärmebedarfskennwerte stammen aus der Tabula-

Studie des IWU und gelten für Gebäudealtersklassen eines bestimmten Gebäudetyps (Loga et al.(2012)). Die Bestimmung des Energiebedarfs basiert auf dem Wissen über die richtigen Wohngebäudetypen. Jeder Typ hat seinen spezifischen Bedarf pro Quadratmeter Wohnfläche. Der Bedarf wird von verschiedenen Faktoren wie Gebäudegröße, Anzahl der Stockwerke, Bestandszeitraum und Anzahl der Nachbargebäude beeinflusst.

Für die Berechnung wurde daher als Grundlage ein Algorithmus entwickelt, welcher eine Datenbank mit den räumlich verorteten Gebäuden erstellt und diese typisiert. Dafür wurden fünf verschiedene Typen von Wohngebäuden ausgewählt (geordnet nach Größe und Einwohnern): Einfamilien-/Zweifamilienhaus, Reihenhaus, Mehrfamilienhaus, großes Mehrfamilienhaus und Hochhaus ((Loga et al. (2012)).

Der Klassifikationsansatz basiert ausschließlich auf Open-Source-Daten des Thüringer Landesamts für Boden und Geoinformation (TLBG). Verwendet werden Gebäudeumrisse, Flurstücke, Adresskoordinaten und 3D-Gebäude in LOD2 (Gröger et al. (2012)). Die Auswahl der Daten erfolgte aufgrund der räumlichen Lage der Modellkommunen in Thüringen. Bei entsprechender Datenverfügbarkeit ist der Ansatz auch auf Gebiete außerhalb Thüringens anwendbar. Der Ablauf der Datenverarbeitung der Klassifizierung ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt.

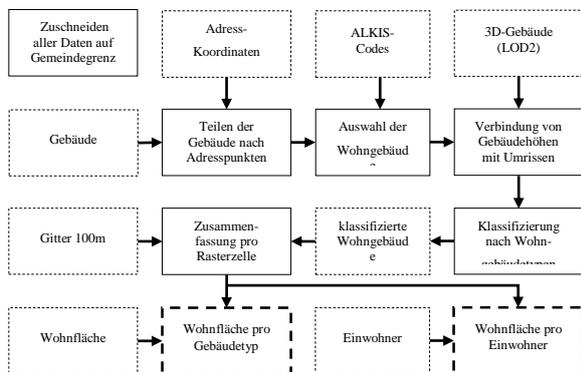


Abbildung 1: Klassifizierungsalgorithmus von Gebäudetypen

Bei Mehrfamilienhäusern, die aus verschiedenen Eingängen bestehen, wird für die Energiebedarfsabschätzung jeder Eingang als eigenes Haus gezählt. Da als Datengrundlage jedoch nur Umriss der gesamten Gebäude vorlagen, werden im ersten Schritt diese Gebäudeumrisse anhand der entsprechenden Adresskoordinaten in einzelne Gebäude aufgeteilt. (Abbildung 2).

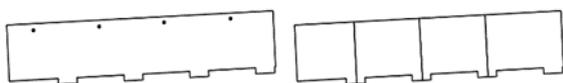


Abbildung 2: Aufteilen von Gebäudeumrissen pro Adresskoordinaten

Dafür werden Schnittlinien mittig zwischen den Adresspunkten senkrecht zur Verbindung der Koordinaten erstellt und die Gebäudepolygone an diesen Linien geteilt. Die Definition der Gebäude nach ALKIS dient anschließend dazu, die Wohngebäude zu identifizieren und zu selektieren.

Die eigentliche Klassifikation der Wohngebäude in die fünf Gebäudetypen folgt einem Entscheidungsbaum-Ansatz. Basierend auf Angaben zur Gebäudehöhe der Bruttogrundfläche und der Angabe freistehend/nicht freistehend, lassen sich die Gebäude aufgrund definierter Schwellenwerte der Thüringer Bauordnung den jeweiligen Klassen zuordnen (Thüringer Landtag 13.03.2014). Ein Beispiel der Klassifizierung siehe Abbildung 3:



Abbildung 3: Klassifizierung des Gebäudetyps

So ist z.B. ein Gebäude als Einfamilienhaus anzusehen, wenn es eine Gebäudehöhe kleiner gleich 9m aufweist, eine Bruttogrundfläche kleiner gleich 400 m² besitzt und freistehend ist. Wichtig ist hierbei, dass die Gebäudetypisierung als Grundlage für die Bedarfsberechnung erfolgt. Es ist damit nicht relevant, dass die Klassifikation in allen Fällen der tatsächlichen Nutzung entspricht, sondern dass die Gebäude einen typischen Wärmebedarf entsprechend der bestimmten Gebäudetypen aufzeigen.

Mit der Kenntnis der Gebäudetypen werden anschließend diese Zuordnung pro Rasterzelle bestimmt und die Wohnfläche pro Typ und pro Einwohner je Zelle berechnet. Die Wohnflächen je Gebäudetyp pro Rasterzelle sind letztendlich die Grundlage für die weitere Berechnung des Wärme- und Strombedarfs. Dafür werden die folgenden Daten verwendet: Einwohnerzahl, Anzahl der Gebäude in verschiedenen Gebäudealtersklassen und Anzahl der Haushalte in verschiedenen Kategorien aus dem Zensus des Jahres 2011 (zeitlich große Differenz zu den Geodaten, jedoch liegen nur hier die Daten pro Rasterzelle vor (Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2011), Koeffizienten für den Wärmebedarf nach Gebäudealtersklasse (Loga et al. 2012) und Koeffizienten für den Strombedarf nach Haushaltskategorie (Statistisches Bundesamt 2019).

Berechnung des Wärmebedarfs

Zur Ermittlung des Wärmebedarfs wird der Anteil der Gebäude in verschiedenen Gebäudealtersklassen aus Zensus-Daten mit den Bedarfskennwerten der zugehörigen Gebäudealtersklassen aus Tabula verrechnet (vgl. Abbildung 4) (Loga et al.(2012)).

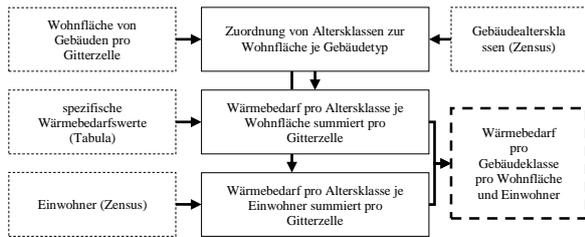


Abbildung 4: Berechnung des Wärmebedarfs

Basierend darauf wird die folgende Formel verwendet, um den gesamten Wärmebedarf $B_{Wärme ges.}$ pro Gitterzelle zu berechnen:

$$B_{Wärme ges.} = A_{Wohnen} \cdot Q_{Gebäudealter} \cdot C_{Wärme} \quad (6)$$

Dabei ist A_{Wohnen} die Wohnfläche pro Gebäudtyp, $Q_{Gebäudealter}$ der prozentuale Anteil von Gebäuden pro Gebäudealtersklasse und $C_{Wärme}$ der entsprechende Wärmebedarfskoeffizient pro Quadratmeter Wohnfläche pro Gebäudtyp je Gebäudealtersklasse.

Zusätzlich zum Gesamtbedarf pro Zelle wird der Wärmebedarf pro Quadratmeter $B_{Wärme m^2}$ und Einwohner $B_{Wärme EW}$ nach folgenden Formeln berechnet:

$$B_{Wärme m^2} = \frac{B_{Wärme gesamt}}{A_{Wohnen}} \quad (7)$$

und

$$B_{Wärme EW} = \frac{B_{Wärme gesamt}}{n_{EW}} \quad (8)$$

Wobei n_{EW} die Zahl der Einwohner aus den Zensusdaten für jede Rasterzelle beschreibt. Die obigen Berechnungen führen zu einer Karte mit Wärmebedarfen wie im Beispiel in Abbildung 5.

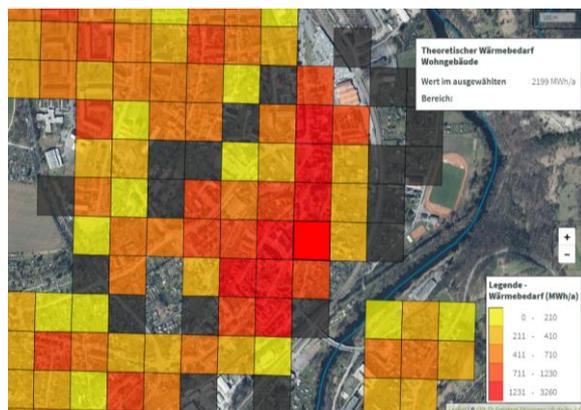


Abbildung 5: Beispielkarte des Wärmebedarfs

Berechnung des Strombedarfs

Die Berechnung des Strombedarfs erfolgt nicht aufgrund von Kennwerten je m² Wohnfläche sondern basiert auf Kennwerten zu Bedarfen von unterschiedlichen Haushaltsgrößen (vgl. Abbildung 6) (Statistisches Bundesamt (2019)). Die Anzahl der Haushalte wurde in den Kategorien 1 Person, 2 Personen und mindestens 3 Personen zusammengefasst.

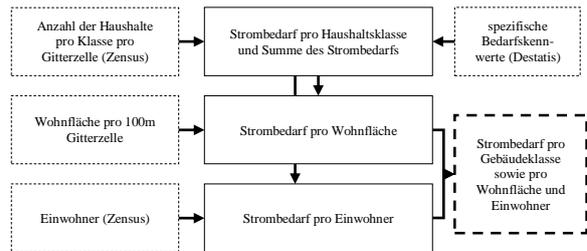


Abbildung 6: Berechnung des Strombedarfs

Der Strombedarf $B_{Strom gesamt}$ pro Gitterzelle wird auf der Grundlage der Anzahl der Haushalte je Kategorie pro Gitterzelle $n_{Haushalte}$ und den Strombedarfskennwerten C_{Strom} berechnet:

$$B_{Strom gesamt} = n_{Haushalte} \cdot C_{Strom} \quad (9)$$

Der Strombedarf pro Wohnfläche und pro Einwohner berechnet sich analog zum Wärmebedarf. Die obige Berechnung führt zu einer Karte mit Strombedarfen wie im Beispiel in Abbildung 7.



Abbildung 7: Beispielkarte des Strombedarfs

ERGEBNISANALYSE UND DISKUSSION

Für die Überprüfung der gewählten Methodik zur Klassifizierung des Gebäudetyps wurden in zwei Modellkommunen Ortsbegehungen durchgeführt und dabei Gebäudeprotokolle erstellt. Zusätzlich wurden die errechneten Wohnflächen und Wärme-Bedarfe mit Ergebnissen aus dem „Kurzverfahren Energieprofil für die einfache energetische Bewertung von Gebäuden“ (KVEP) des Instituts für Wohnen und Umwelt in Darmstadt verglichen (Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU)).

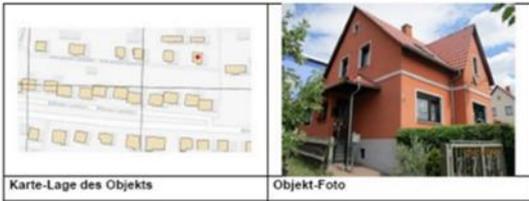
Klassifizierung des Gebäudetyps

Im Juli 2019 wurden in der Modellkommune Kahla im Saale-Holzland-Kreis in Thüringen Ortsbegehungen durchgeführt, um die dem TRAIL-Tool zugrunde liegende Gebäudetypisierung zu prüfen. Kahla hat eine Gemarkungsgröße von 7,96 km², die Statistik zählt 2019 insgesamt 7.028 Einwohner. Laut ALKIS-Datenbank gibt es in Kahla 2.211 Wohngebäude (Thüringer Landesamt für Vermessung 2015).

Aus dieser Datenbank wurden zufällig 100 Gebäude ausgewählt, bei denen ein Adresspunkt hinterlegt ist, kleine Gebäude wie Garagen, Anbauten oder Teilgebäude wurden vorab herausgefiltert. Die Zufallsauswahl wurde in folgende Gruppen proportional zur Gesamtanzahl jedes Gebäudetyps der Grundgesamtheit aufgeteilt: Einfamilien-, Reihen- und Mehrfamilienhäuser sowie große Mehrfamilienhäuser und Nichtwohngebäude.

Im Rahmen der Vor-Ort-Erfassung wurden je Gebäude die Lage, eine Außenaufnahme sowie die Parameter Gebäudetyp, geschätzte Gebäudehöhe, Altersklasse, Bruttogeschossfläche und Sanierungsstand eingeschätzt und dokumentiert. Zudem wurde jeweils die berechnete Bruttogeschossfläche aus TRAIL zugewiesen und die entsprechende TABULA-Kennzeichnung hinterlegt. Abbildung 8 zeigt ein solches Gebäudeprotokoll.

Gebäudeprotokoll in Kahla Nr.: 1
Adresse: Am Alten Gericht 5
 Datum Besichtigung: 05.07.2019
 Gebiet oder Gruppe in der Karte: oranger Stern



Datenerfassung	Angaben	Notizen/Anmerkungen
Gebäudetyp vor Ort (WG+Typ./NWG)	EFH	
Gebäudetyp TRAIL	EFH	
Gebäudetyp RE'ASON	unbekannt	
Gebäudehöhe (geschätzt)		
Gebäudehöhe: ≤ 10 m	x	
Gebäudehöhe: 10 m $< x \leq 25$ m		
Gebäudehöhe: ≥ 25 m		
Geschossanzahl:	EG+DG	
Bruttogeschossfläche (geschätzt)		TRAIL A=73 m ²
BGF: ≤ 40 m ²		
BGF: ≤ 400 m ²	x	RE'ASON BP: ca. 114 m ²
BGF: 400 m ² $< x \leq 600$ m ²		
BGF: ≥ 600 m ²		
Sanierungszustand (geschätzt): Neubau/Altbau/energ. saniert	saniert	WDVS+Doppelverglasung
Gebäudealtersklasse (geschätzt):	EFH_G-1979-1993	

Abbildung 8: Gebäudeprotokoll Kahla

Im Ergebnis erkennt das TRAIL-tool 76% der Gebäude korrekt. Von den nicht richtig erkannten Gebäuden sind mehr als die Hälfte Einfamilienhäuser (EFH), von denen wiederum die meisten Gebäude als Mehrfamilienhäuser (MFH) oder große Mehrfamilienhäuser (GMH) eingestuft werden. Diese falsch eingestuften Gebäude sind ausnahmslos ältere Gebäude, die in der Regel über hohe Decken und Dachräume verfügen, die nicht ausgebaut sind. Aus diesem Grunde wird vielfach ein Geschoss zusätzlich in der automatisierten Berechnung der Bruttogeschossflächen berücksichtigt.

Darüber hinaus gibt es unter den falsch erkannten Wohngebäuden solche mit Geschäften im Erdgeschoss, hier liegt eine teilweise gewerbliche Nutzung vor. Diese Gebäude gelten als Wohngebäude, da die überwiegende Nutzung die Wohnnutzung ist.

Untersuchungen mit fast identischen Ergebnissen wurden in einer weiteren Modellkommune (Großobringen im Landkreis Weimarer Land) durchgeführt. Das Untersuchungsgebiet dort umfasste den kompletten Ort mit einem Wohngebäudebestand von 312 Gebäuden, die sich aufteilen auf 299 Ein- und Zweifamilienhäuser, sowie acht Mehrfamilienhäuser. Nichtwohngebäude, wie z.B. der Kindergarten, die Feuerwehr und das Rathaus, die Kirche sowie Immobilien für Gewerbe, Dienstleistung und Handel wurden in Großobringen nicht berücksichtigt.

Zusammenfassend kann aus diesen Ergebnissen festgehalten werden, dass die „Klassifizierung des Gebäudetyps“ im TRAIL-tool mit vertretbaren Einschränkungen möglich ist.

Wohnfläche und Wärmebedarf

Grundlage der energetischen Bewertung der Gebäude bilden frei zugängliche Daten, die durch eine Ortsbegehung ergänzt wurden. Mit dem ALKIS-Messmodul (Thüringer Landesamt für Vermessung 2015) wurden die Grundflächen der Gebäude herausgemessen und deren Kompaktheit festgestellt. Anhand der hinterlegten Luftbilder wurden Anbauverhältnisse sowie Dachformen und Dachaufbauten bestimmt. Zudem wurden über vorhandene Dachflächenfenster erste Rückschlüsse auf möglichen Wohnraum unter dem Dach gezogen und Solarthermieanlagen zur Brauchwassererwärmung festgestellt. Historische Luftbilder wurden herangezogen, um eine erste Einordnung der Gebäude hinsichtlich ihres Baualters vornehmen zu können. Entsprechendes Bildmaterial steht im Geoportal Thüringen für die Jahre zwischen 1944 und 1953 und von 1982 bis heute zur Verfügung.

Bei der Ortsbegehung wurde zudem die Bauweise (massiv oder leicht), die Geschossigkeit und die Raumhöhen abgeschätzt. Außerdem wurden Annahmen über die Anzahl der Wohneinheiten, Unterkellerung und das Vorhandensein beheizter Wohnräume in den Dach- und Kellergeschossen getroffen. Auch Anbauten und angrenzende Gebäude wurden in diese Betrachtungen einbezogen. Die Baualtersklasse der Gebäude wurde abgeschätzt und mögliche energetischen Verbesserungsmaßnahmen aufgenommen. Abbildung 9 zeigt das Untersuchungsgebiet der Modellkommune Großobringen mit der Einteilung der Baualtersklassen.

Aus der äußeren Betrachtung des Erscheinungsbildes der Gebäude wurden Rückschlüsse auf mögliche Sanierungsmaßnahmen am Gebäude gezogen. Zur Bewertung der vorhandenen Anlagentechnik wurde der Bezirksschornsteinfegermeister befragt und damit Informationen über Brennstoff, Art, Baujahr und Aufstellraum des Wärmeerzeugers eruiert. Im Neubaugebiet wurde das Baualter des Wärmeerzeugers gleichgesetzt mit dem Baualter des Gebäudes, da bei den Gebäuden dieser Altersklassen kaum davon auszugehen ist, dass der Wärmeerzeuger bereits ausgetauscht wurde. Da nicht für alle Gebäude Informationen zur Anlagentechnik vorlagen, wurden Annahmen getroffen. Bei Gebäuden ab Baujahr 2009

wurde bei mangelnder Angabe der Einsatz von Luft-Wasser-Wärmepumpen unterstellt.

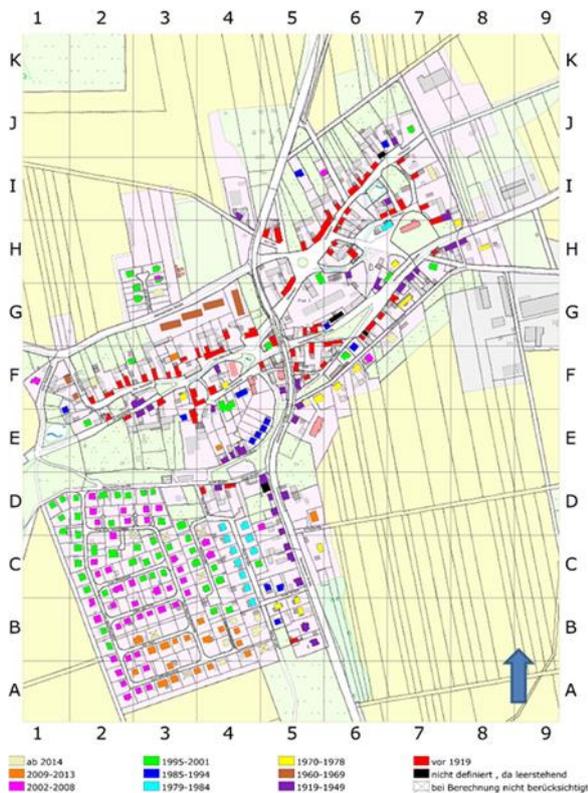


Abbildung 9: Großbringen, Übersicht Baualtersklassen

Bei Gebäuden älteren Datums ohne Information zur Art der Beheizung wurde angenommen, dass Nachtspeicheröfen und Elektrodurchlauferhitzer für die Warmwasserbereitung zum Einsatz kommen. Dies korrespondiert auch mit den Angaben, die aus dem Zensus 2011 ersichtlich sind, wonach 30 Gebäude mit Nachtspeicheröfen beheizt werden (Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2011).

Die erhobenen Daten wurden in detaillierten Gebäudeprotokollen festgehalten und damit für jedes Gebäude mit dem KVEP eine energetische Bewertung durchgeführt. Dazu werden die spezifischen Daten des Gebäudebestandes in folgenden drei Bereichen eingegeben:

- 1) Flächen der Bauteile im Flächenschätzverfahren in Abhängigkeit von beheizter Wohnfläche, Geschossigkeit, Anbausituation, Geschosshöhe, Art und Form von Keller und Dachgeschoss
- 2) thermische Qualität der Bauteile durch pauschale U-Werte in Abhängigkeit der Baualtersklasse und der Bauweise
- 3) energetische Qualität der Anlagentechnik durch Pauschalwerte für die Anlagentechnik in Abhängigkeit von der Art des Brennstoffs, der Art und des Alters des Wärmeerzeugers für Heizung und Warmwasser sowie des Dämmstandards der Wärmeverteilung.

Die beheizte Wohnfläche als Eingangsgröße wurde dabei aus der Gebäudegrundfläche ermittelt. Dabei wurde bei Vollgeschossen die Bruttogrundfläche, in Abhängigkeit von der Anzahl der Wohneinheiten im Gebäude, mit einem pauschalen Faktor zwischen 0,73 bei Mehrfamilienhäusern, bis 0,78 bei Einfamilienhäusern, multipliziert. Die Faktoren entstammen Erfahrungswerten der Autoren in Anlehnung an die Wohnflächenermittlung im KVEP. Wohnflächen in Dachgeschossen unter Dachschrägen wurden gemäß den gesetzlichen Vorgaben der Verordnung zur Berechnung der Wohnfläche in Abhängigkeit von den lichten Raumhöhen ermittelt. Für die Bestimmung beheizter Wohnflächen in Kellergeschossen wurden Annahmen in Abhängigkeit von Gebäudeart und Baualtersklasse getroffen. Wohnraum wurde auch dort berücksichtigt, wo durch den Geländeverlauf Kellergeschosse nur teilweise im Erdreich liegen.

Für Gebäude ab der Baualtersklasse 2002 bis 2009 sind im KVEP keine U-Werte hinterlegt. Daher wurden diese an die höheren Anforderungen der ab 2002 gültigen Energieeinsparverordnung EnEV angepasst. Zudem wurden entsprechend der Wärmebrückenzuschlag, Temperaturfaktoren und der Klimadatensatz aktualisiert.

Nach Eingabe der spezifischen Gebäudedaten des Gebäudebestandes wurden die Berechnungsergebnisse nach Adressdaten den einzelnen Rasterzellen zugeordnet und die gewonnenen Daten aufsummiert. In der Analyse wurden Gebäude, die sich nur teilweise in der Rasterzelle befinden, mit dem entsprechenden Flächenanteil gewertet. Abbildung 10 zeigt den Vergleich der Wohnfläche je 100x100m-Rasterzelle in TRAIL und dem KVEP.

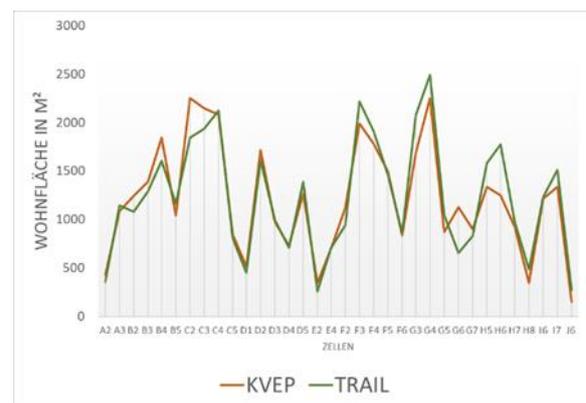


Abbildung 10: Vergleich der Wohnflächen je Zelle

Es zeigt sich, dass bei beiden Verfahren eine hinreichende Übereinstimmung bei der Berechnung der Gesamtwohnfläche innerhalb der Kommune erzielt wurde, die Abweichungen liegen insgesamt bei unter 3 %. Die Abweichungen sind dort am größten, wo ausgebaute Dachgeschosse und ggf. auch ein hoher Anteil an beheizter Kellerfläche vorliegen, da von pauschalen Ansätzen bei der Berechnung des Wohnraumes in Dachräumen ausgegangen wurde.

Festzuhalten ist zudem, dass die Daten aus dem Liegenschaftskataster nicht aktuell sind, teilweise werden hier Gebäude, die tatsächlich zu Wohnzwecken dienen, noch als Nebengebäude dargestellt. Somit wurden teilweise Gebäude bei der Bestandsaufnahme nicht berücksichtigt, die schon Eingang in den Zensus gefunden haben. Anbauten wurden teilweise nicht berücksichtigt, da nicht klar war, ob diese zur beheizten Wohnfläche gehören, insbesondere bei kleineren, eingeschossigen Anbauten.

Zum Vergleich des Wärmebedarfs wurde der Nettoheizwärmebedarf für die komplette Zelle im KVEP berechnet. Die prozentualen Anteile der jeweiligen Baualtersklassen an der Gesamtwohnfläche nach Bestandsanalyse werden innerhalb der Zelle ermittelt. Dieser Prozentsatz wird dazu verwendet, die nach TRAIL bestimmte Wohnfläche innerhalb der Zelle ebenfalls den Baualtersklassen zuzuordnen.

Der spezifische Transmissionswärmeverlust HT' wurde außerdem je Baualtersklasse und Gebäudetyp gemittelt, zum direkten Vergleich zu den bei TRAIL verwendeten Werten aus Tabula. Der Vergleich zu den Wärmebedarfen erfolgt über den Nettoheizwärmebedarf, der jeweils bezogen auf die Wohnfläche und als Gesamtwärmebedarf pro Jahr angegeben wird.

Durch Multiplikation mit dem baualtersklassenbezogenen Nettoheizwärmebedarf aus Tabula wird ein theoretischer Gesamtwärmebedarf in kWh/a berechnet und in Bezug zur Gesamtwohnfläche nach TRAIL ein Wärmebedarf innerhalb einer Zelle ermittelt. Die nachfolgende Übersicht gibt das Verhältnis der Berechnungsergebnisse je Zelle wieder.

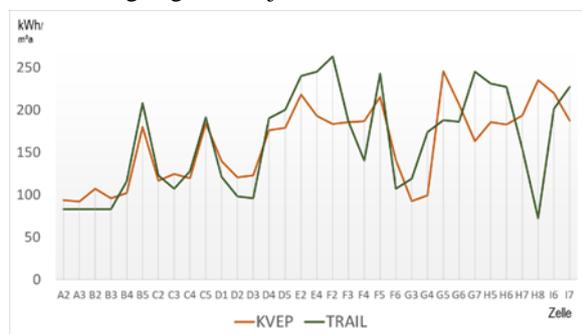


Abbildung 11: Vergleich der Wärmebedarfe je Zelle

Hier ist grundsätzlich die Tendenz erkennbar, dass bei den TRAIL-Werten eine größere Spreizung vorliegt. Dies erklärt sich zunächst daraus, dass im älteren Gebäudebestand bei KVEP gewisse Sanierungsraten unterstellt wurden, die Wärmebedarfe damit insgesamt niedriger bleiben. Im Neubaugebiet beispielsweise (Zellen A2, A3, B2 und B3) weichen die berechneten Werte nach TRAIL-Tool und KVEP nur gering voneinander ab.

In einigen Zellen ist der nach TRAIL berechnete Wärmebedarf jedoch höher. In diesen Zellen handelt es sich überwiegend um Gebäude älterer Baualtersklassen, bei denen im KVEP ein gewisser Sanierungsgrad unterstellt wurde, der jedoch nach den Daten aus der Vor-Ort-Erfassung nicht erkennbar ist.

Dort, wo der Wärmebedarf nach TRAIL zellenbezogen jeweils am höchsten ist, wird angenommen, dass die Einstufung der Gebäude in der Analyse falsch gewählt wurde. In diesen Zellen war die Abschätzung der Baualtersklasse schwierig, insbesondere bei den Baualtersklassen zwischen 1919 und 1949.

ZUSAMMENFASSUNG

Die TRAIL zugrundeliegende Methode ermöglicht es, kleinen Kommunen im ländlichen Raum einen schnellen und kostenlosen ersten Überblick über ihren aktuellen Wärme- und Strombedarf zu geben, ohne aufwendige Bestandsaufnahmen durchführen zu müssen. Damit kommt die Software den Anforderungen der Kommunen entgegen, mit geringen Ressourcen in das Thema Energiewende im ländlichen Raum einzusteigen. Es hilft damit, technische Komplexität zu vereinfachen und Entscheidungsprozesse zu unterstützen.

Erste Vergleiche der TRAIL-Ergebnisse durch Vor-Ort-Begehungen und Berechnungen mit dem Kurzverfahren Energieprofil zeigen nur geringe Abweichungen bei der Ermittlung des Gebäudetyps, der Wohnfläche und des Wärmebedarfs. Diese Ergebnisse werden in die Weiterentwicklung des Tools einbezogen, das ab dem II. Quartal 2020 allen Kommunen in Thüringen frei zur Verfügung steht.

DANKSAGUNG

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Forschungsprojekts „Transformation im ländlichen Raum 2“, das im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert wird.

LITERATURVERZEICHNIS

- Ascione, Fabrizio; Masi, Rosa F. de; Rossi, Filippo de; Fistola, Romano; Sasso, Maurizio; Vanoli, Giuseppe Peter (2013): Analysis and diagnosis of the energy performance of buildings and districts: Methodology, validation and development of Urban Energy Maps. In: *Cities* 35, S. 270–283.
- Becker, Sören; Naumann, Matthias (2016): Energiekonflikte nutzen. Wie die Energiewende vor Ort gelingen kann. Erkner. Online verfügbar unter <https://energie.wfbb.de>.
- Benedek, Jozsef; Sebestyen, T.; Bartok, Blanka (2018): Evaluation of renewable energy sources in peripheral areas and renewable energy-based rural development 90, S. 516–535.
- Bivand, Roger; Hauke, Jan; Kossowski, Tomasz (2013): Computing the Jacobian in Gaussian spatial autoregressive models. An illustrated comparison of available methods. In: *Geographical Analysis* 45 (2), S. 150–179.
- Bugs, G.; Garnell, C.; Fonts, O.; Huerta, J.; Painho, M. (2010): An assessment of Public Participation GIS and Web 2.0 technologies in urban planning practice in Canela, Brazil. In: *Cities* 27 (3), S. 172–181.

- Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (2017): Geographische Gitter für Deutschland. GeoGitter. Online verfügbar unter <https://www.geodatenzentrum.de/docpdf/geogitter.pdf>, zuletzt geprüft am 07.01.2019.
- Bundesregierung (2019): Gesetz zur Einführung eines Bundes-Klimaschutzgesetzes und zur Änderung weiterer Vorschriften. KSG. Online verfügbar unter <http://www.bgbl.de>.
- Byrne, J.; Corgnati, S. P.; Filippi, M. (2008): Evaluating the potential of small-scale renewable energy options to meet rural livelihoods needs: GIS- and lifecycle cost-based assessment of Western China's options. In: *Energy Policy* 35, S. 4391–4401.
- Cajot, S.; Peter, M.; Bahu, J.-M.; Guignet, F.; Koch, A.; Marechal F. (2017): Obstacles in energy planning at the urban scale. In: *Sustainable Cities and Society* 30 (2210-6707), S. 223–236.
- ECOSPEED AG (2018): ECOSPEED. Climate Software Solutions. Online verfügbar unter <https://www.ecospeed.ch/private/en/>.
- Eurostat regional yearbook. 2019 edition (2019). 2019 edition. Luxembourg: Publications Office of the European Union (Statistical books, 2019).
- Gröger, Gerhard; Kolbe, Thomas H.; Nagel, Klaus; Häfele, Karl-Heinz (2012): OGC City Geography Markup Language (CityGML) En-coding Standard (2.0.0). Online verfügbar unter <https://portal.opengeospatial.org/>.
- Hijmans, Robert J. (2017): raster. Geographic Data Analysis and Modeling. Online verfügbar unter <https://CRAN.R-project.org/package=raster>.
- HOTMAPS (2018): HOTMAPS Project. Hg. v. HOTMAPS consortium. Online verfügbar unter <http://www.hotmaps-project.eu>.
- Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU): Institut Wohnen und Umwelt (IWU): Kurzverfahren Energieprofil. Online verfügbar unter <https://www.iwu.de/forschung/energie/kurzverfahren-energieprofil/>.
- Kirnats, Lev; Joost, Jan-Niklas; Berg, Sebastian; Frisch, Jérôme; van Treeck, Christoph (2018): Status Quo bei digitalen Werkzeugen und softwarebasierten Lösungsansätzen. In: *Bauphysik* 40 (6), S. 441–448. DOI: 10.1002/bapi.201800031.
- Loga, Tobias; Diefenbach, Nikolaus; Stein, Britta; Born, Rolf (2012): Typology Approaches for Non-residential Buildings in Five European Countries - Existing Information, Concepts, and outlooks. Tabula Thematic Report No. 3. Unter Mitarbeit von Intitut Wohnen und Umwelt, Darmstadt - Germany. Typology Approach for Building Stock Energy Assessment.
- OECD (2012): Linking renewable energy to rural development. Paris: OECD publ (OECD green growth studies).
- Pebesma, Edzer (2018a): lwgeom. Bindings to Selected 'liblwgeom' Functions for Simple Features. Online verfügbar unter <https://CRAN.R-project.org/package=lwgeom>.
- Pebesma, Edzer (2018b): sf. Simple Features for R. Online verfügbar unter <https://CRAN.R-project.org/package=sf>.
- Pfenning, Uwe (2018): Eine soziologische Systemanalyse und sozio-ökonomisches Review der Soziotechnik Energiewende. In: *Zeitschrift für Energiewirtschaft* 42 (2), S. 151–166.
- Poggi, Francesca; Frimino, Ana; Amado, Miguel (2018): Planning renewable energy in rural areas: Impacts on occupation and land use. In: *Energy and Buildings* 155, S. 630–640.
- Sperling, K.; Hvelplund, F.; Mathiesen, B. V. (2011): Centralisation and decentralisation in strategic municipal energy planning in Denmark. In: *Energy Policy* 39, S. 1338–1351.
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder (Hg.) (2011): ZENSUS 2011. Online verfügbar unter <https://www.zensus2011.de>.
- Statistisches Bundesamt (2019): Startseite - Statistisches Bundesamt. Destatis. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de>.
- Team, R. Core (2017): R. A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. Online verfügbar unter <https://www.R-project.org/>.
- Thüringer Landesamt für Vermessung (2015): Thüringer ALKIS® - Objektartenkatalog. auf Basis der GeoInfoDok Version 6.0.1. Online verfügbar unter <https://www.thueringen.de>.
- Thüringer Landtag (13.03.2014): Thüringer Bauordnung. ThürBO. Fundstelle: GVBl. 2014, 49. Online verfügbar unter <http://www.parldok.thueringen.de>.
- Zanon, B.; Verones, S. (2013): Climate change, urban energy and planning practices: Italian experiences of innovation in land management tools. In: *Land Use Policy* 32, S. 343–355.

XI: Low carbon building simulation

IAQ SIMULATION – GOING BEYOND CO₂ CONCENTRATION FOR THE ASSESSMENT OF TWO INNOVATIVE VENTILATION CONCEPTS

G. Rojas^{1,2}

¹Department Smart Buildings, Salzburg University of Applied Sciences, Kuchl, Austria

²Unit for Energy Efficient Buildings, University of Innsbruck, Austria

ABSTRACT

This simulation study was performed within the framework of IEA EBC Annex 68 and assesses two innovative ventilation concepts in terms Indoor Air Quality (IAQ), namely the extended cascade ventilation and the active overflow ventilation concept. Both aim at reducing costs and spatial requirements for mechanical ventilation with heat recovery (MVHR) in low-energy housing. In a simple co-simulation approach CO₂, formaldehyde and particulate matter (PM) concentration is evaluated for a representative Austrian dwelling. Besides sources and sinks for CO₂, humidity and particulate matter (size resolved), the temperature and humidity dependent emission rate of formaldehyde from building materials is modelled.

INTRODUCTION

As a consequence to today's airtight building construction, ventilation measures have to be considered and appropriately designed. Building simulation can help to identify a sensible ventilation concept and allows for optimizations in terms of indoor air quality (IAQ), energy-use and cost-effectiveness. However, typically building energy simulations do not address IAQ and if so, only in a very simplified form, e.g. CO₂ concentration arising from human occupancy. However, other pollutants sources should be considered when designing building ventilation. Within the framework of IEA EBC Annex 68 the most relevant pollutants in low-energy housing were identified, sources characterized and simulation methods tested.

This work builds upon the results of this IEA project to assess two innovative ventilation concepts in terms IAQ and energy performance, namely the extended cascade ventilation and the active overflow ventilation concept. The first is based on the simple idea of not directly supplying air into the living room, provided that the floor plan permits. The latter provides a possible solution for refurbishment projects where it is not possible to route air ducting into each bedroom.

VENTILATION CONCEPTS

There is no uniform strategy on how to ensure sufficient ventilation in residential buildings within the European Union (EU). Within a survey, national building codes and guidelines regarding residential ventilation have been reviewed (Zukowska et al. 2020). Therein, stakeholder interviews reveal that, while mechanical ventilation with heat recovery (MVHR) is well accepted in some countries, a number of barriers impede a more widespread implementation. Costs and spatial requirements, including duct routing, were identified as specific challenges for the implementation of MVHR, in particular in refurbishment projects. Various innovative solutions have been proposed to address these barriers (Kolarik (Ed.) and Rojas (Ed.) 2020).

This simulation study assesses two concepts that aim to reduce the required ducting within a dwelling and compares them with a conventional MVHR implementation and an extract air system. The two innovative concepts are suitable for centralized (one unit for several dwellings) and decentralized (one unit per dwelling) MVHR systems alike.

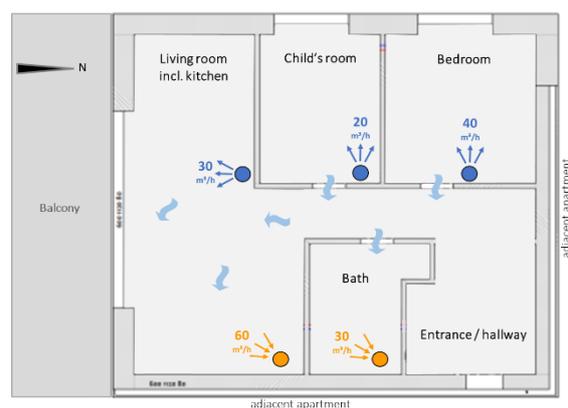


Figure 1: Floor plan of the simulated dwelling with a conventional MVHR ventilation concept: air is supplied into living room, child's room and bedroom and air is extracted from kitchen area and bath.

A conventional residential MVHR system requires supply and extract air ducting to each room of the dwelling. Fresh air is supplied into living room, bedrooms, workrooms, etc. while “used” air is

extracted from wet rooms, i.e. kitchen, bath and toilet (if needed also from the storerooms). Hallways act as overflow zones, where the air can flow from supply air rooms to extract air rooms. That way, the hallway are also sufficiently ventilated. Figure 1 shows this standard implementation of a MVHR system for the simulated dwelling.

Extended cascade ventilation

The so-called “extended cascade ventilation” principle was first documented in Swiss projects (Fraefel 1999) and systematically investigated in an Austrian research project (Sibille et al. 2013). It is based on the conventional MVHR concept but omits, provided that the floor plan permits, the supply air opening in the living room. In this research project it was concluded that many modern floor plans are such, that the overflowing air from the bedrooms will have to pass the living room zone on the way to the extract air rooms. Besides saving ducting, a silencer and an outlet, the air is most effectively used and the total air exchange rate can be reduced compared to the standard layout with supply air for the living room. Figure 2 shows the implementation of this extended cascade principle for the simulated floor plan. Note that the total supply air for the entire dwelling is reduced to 60 m³/h compared to 90 m³/h for the conventional MVHR concept.

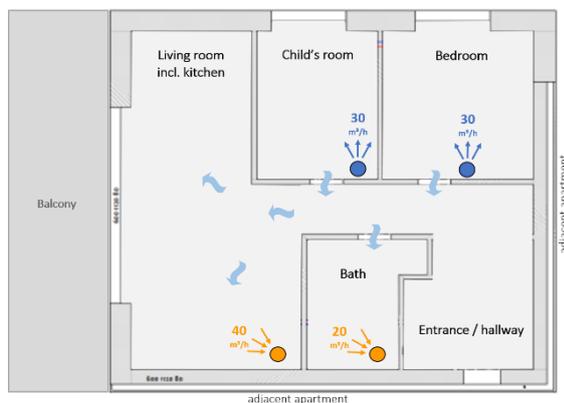


Figure 2: Floor plan of the simulated dwelling with an extended cascade ventilation concept: the living room is only supplied indirectly via overflowing air from the bedrooms.

Active overflow concept

The so-called “active overflow” ventilation principle provides a possible solution for refurbishment projects where it is not possible to route air ducting into each supply air room, i.e. bedrooms. Instead, one active overflow element (AOE) and one passive overflow element is installed in each room. It will move air from the connecting room, e.g. corridor or living room, into the room in question and back out. In its minimal form, such AOE consists of a sound protected passage, a

silent fan, and a control mechanism that ensures the fan is only running when the door of that room is closed. The AOE is often integrated in the door itself, which can simplify the refurbishment process (Sibille and Pfluger 2015). The connecting room, i.e. the corridor or living room, has to be well ventilated by the MVHR system. Extract air rooms should be connected to the MVHR via conventional ducting, which is usually not a problem (e.g. within a suspended ceiling). Figure 3 shows the implementation of this concept in the floor plan of the herein investigated dwelling. Note that the total supply air for the entire dwelling is 120 m³/h compared to 90 m³/h for the conventional MVHR concept.

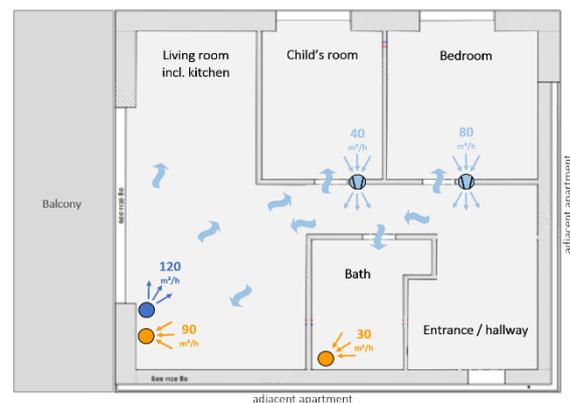


Figure 3: Floor plan of the simulated dwelling with an active overflow ventilation concept: no supply air ducting is needed as the bedroom and the child's room are ventilated with active overflow elements.

SIMULATION METHOD

In a simple co-simulation approach, applying the building energy simulation (BES) software DynBil (PHI n.d.) and the multi-zonal air flow simulation software CONTAM (Dols and Polidoro 2015), the room concentration of CO₂, formaldehyde and particulate matter as well as air humidity is calculated for a representative Austrian dwelling. Besides sources and sinks for CO₂, humidity and particulate matter (PM), the temperature and humidity dependence of the emission rate of formaldehyde from building materials is modelled.

Based on a residential low-energy building project in Austria (Ploss and Hatt 2016), a two-bedroom apartment was modelled in DynBil and in CONTAM. The floor plan is shown in Figure 1-3. It has a floor area of 76 m² and represents a typical Austrian apartment. The occupancy and window use is based on a literature review undertaken for previous simulation studies, e.g. (Rojas, Pfluger, and Feist 2016) with three occupancy schedules representing a full-time employed person, a person staying at home and a school child.

Airflow model

All airflow relevant aspects, such as air terminals, overflow openings, in-/exfiltration cracks, etc. are modelled within CONTAM. Envelope leakages are modelled with two “cracks” in each exterior wall at two different heights (1 m and 2.2 m representing regular windows and 0 m and 2.2 m representing tall windows) to allow for stack-effect driven infiltration. The cracks are evenly distributed and dimensioned to result in an air exchange of 0.6 h^{-1} at 50 Pa, the threshold for Passive House certification. The wind pressure is calculated using a wind speed modifier, representing a height of 10 m in suburban terrain and wind pressure profile representing a low-rise building (ASHRAE 2005). Wind speed, ambient temperature, solar radiation, etc. are defined by a standardised weather file for the city of Vienna generated with the software Meteonorm.

The reference model has a balanced mechanical ventilation with heat recovery (MVHR), with filtered ambient air being supplied into bedrooms and living room and “used” air being extracted from kitchen area and bathroom. The supply and extract airflows are shown in Figure 1. The investigated extended cascade ventilation concept has same amount of air coming from the MVHR system (filtered) being supplied into bedroom and child’s room. However, no air from the MVHR is directly supplied into the living room, see Figure 2. The active overflow concept model has $120 \text{ m}^3/\text{h}$ of air from the MVHR system (filtered) being supplied into the living room. Bedroom and child’s room are supplied only indirectly via active overflow elements. For comparison, an extract air system was also simulated. The extract air flows from kitchen area and bath were $60 \text{ m}^3/\text{h}$ and $30 \text{ m}^3/\text{h}$. The make-up air enters via dedicated openings in living room, child’s room and bedroom. Those openings were modelled with a nominal pressure drop of 10 Pa at $30 \text{ m}^3/\text{h}$, $20 \text{ m}^3/\text{h}$ and $40 \text{ m}^3/\text{h}$, respectively. For all cases the bedroom and child’s room door, modelled as two-way airflow paths, are closed during the night and open during the day. The bathroom door opens five times for 10 minutes each over the course of the day. The opening between hallway and living room is also modelled as a permanently open two-way airflow path, with 2.5 m height and 1.2 m width.

Thermal model

In the BES-software (DynBil), all airflows are aggregated to two values per interzonal exchange (including exchange with ambient and MVHR system). The unknown values (e.g. in-/exfiltration flows) are estimated for the first simulation run. The thermal model reflects a brick construction in Passive House standard. The external walls are composed of an outer plaster layer, 30 cm EPS insulation, 12 cm of brick and an inner plaster layer resulting in an U-value of $0.11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. The living room has a glazing area of 6.3 m^2 (south-facing), the child’s room and the

bedroom have a glazing area of 2.0 m^2 each (west-facing). The triple pane glazing was modelled with an U-value of $0.72 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ and a g-value of 0.53. An ideal heating with a set-point temperature of 22°C for living room, child’s room and bedroom and a set-point temperature of 23°C was implemented in the reference model. Further details of the BES model are documented in (Rojas et al. 2015).

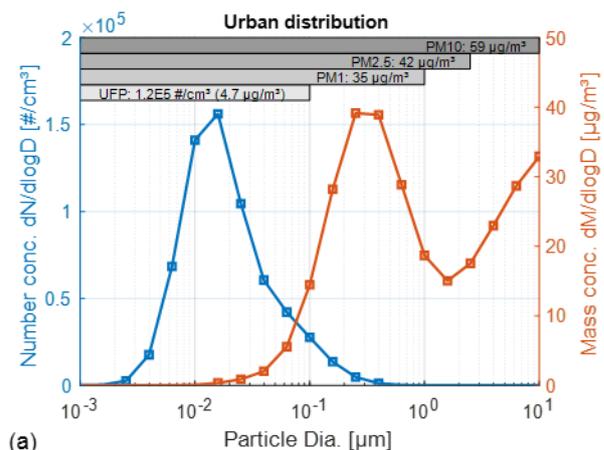
Pollutant sources and sinks

CO_2 emission from the occupants and humidity sources (occupants, cooking, showering, etc.) are based on weekly schedules representing the three-person household. Details are documented in (Rojas et al. 2016).

The exposure to particulate matter (PM) was simulated for particle diameters ranging from 1 nm to $10 \mu\text{m}$ with 21 bins evenly distributed on a log scale. Ambient air concentration, filtration efficiency, particle penetration through the building envelope, particle deposition and particle sources were considered as size dependent functions.

Particulate matter

The outdoor PM distribution was modelled based on values for archetypical urban air as reported in (Ruprecht 1993).



(a) *Figure 4: Characteristic ambient particle distributions for urban areas taken from (Ruprecht 1993). The plots show the log-normalized distributions for particle number and mass concentration assuming a particle density of $1 \text{ g}/\text{cm}^3$. From: (Rojas 2019)*

Due to lack of time-resolved data, ambient air concentration was modelled constant. Note that the concentration levels for the reference case, i.e. a $\text{PM}_{2.5}$ of $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$, will not necessarily represent a typical long-term average of a European city. E.g. the yearly $\text{PM}_{2.5}$ average in Austrian cities has been declining and was roughly around $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in 2017.

However, the used distribution may very well present a short-term average in an urban area in Europe or e.g. a long-term average in a moderately polluted Asian city.

For the simulation case with MVHR, the ambient air filter quality reflect a F7 standard according to EN 779:2012, with fractional efficiency curves taken from (Shi 2012). The simulated extract air system assumed no filtration for the make-up air (unfiltered trickle-vent openings). Particle penetration through the envelope was modelled based on measurements results for an aluminium crack with a width of 0.25 mm and a flow length of 9.4 cm (Liu and Nazaroff 2003). Deposition is also an important particle loss mechanism which strongly depends on particle size. Deposition rates in residential settings has been investigated numerously. For this study, the deposition loss coefficient function as specified in (Riley et al. 2002) was used for the reference model. It is based on experimental data for particle diameters >0.06 µm and on the smooth indoor surface particle deposition theory of (Lai and Nazaroff 2000) for diameters below that value.

Cooking is considered one of the major indoor PM source and numerous studies have investigated the resulting PM concentrations and/or characterised emission rates from various cooking activities, e.g. (Abdullahi, Delgado-Saborit, and Harrison 2013; Wallace, Emmerich, and Howard-Reed 2004). Therefore, this study only implemented indoor PM sources representing cooking activities, i.e. toasting, frying burger and heating oil. These three source events, modelled as a burst source (instantons release during one simulation time step of 5 min), were scheduled in the morning (7:30), at noon (12:00) and in the evening (18:30), respectively. The source strength was determined from experimental data gathered during laboratory measurements. Preliminary results were reported in (Rojas, Delp, and Singer 2018).

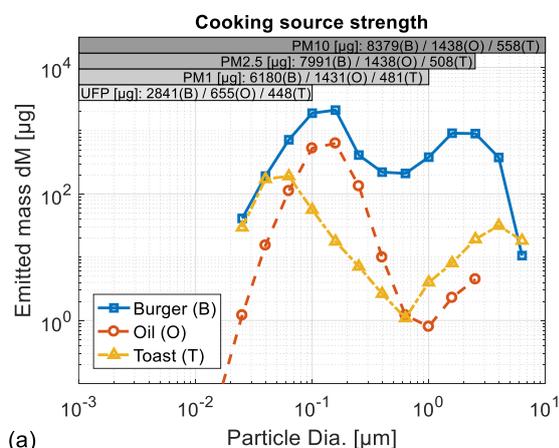


Figure 5: Cooking source strength extracted from experimental data from measurements in a test chamber. From: (Rojas 2019)

Further details on the PM modelling are documented in (Rojas 2019).

Formaldehyde

The formaldehyde emissions from the floor material within each zone were modelled based on the approach developed in (De Jonge 2018). Therein, the emission rate $E(t)$ is modelled as a function of time t , material thickness δ (emitting floor layer in our case), diffusion coefficient D_m and initially emitable concentration C_0 as proposed in (Xiong et al. 2013).

$$E(t) = 2.1 \frac{D_m C_0}{\delta} e^{(-2.36 \frac{D_m t}{\delta^2})} \quad (1)$$

D_m and C_0 are expressed as functions of temperature T and absolute humidity x as derived empirically in (Deng, Yang, and Zhang 2009; Liang, Lv, and Yang 2016). See Equation 2 and 3:

$$D_m(T) = d_1 T^{1.25} e^{(-\frac{d_2}{T})} \quad (2)$$

$$C_0(T, x) = (1 + C_1 x) C_2 T^{-0.5} e^{(-\frac{C_3}{T})} \quad (3)$$

The temperature evolution of the upper floor layer calculated in the previous BES-run (see Co-simulation below) and the calculated zone humidity were used as input for this formaldehyde source model. The chosen parameters $d_1=7.14 \cdot 10^{-17}$, $d_2=284$, $C_1=0.19$, $C_2=1 \cdot 10^{17}$, $C_3=6640$ result in emissions representing a 12 mm thick medium density fiber (MDF) board. The initial emission rate (at 20°C and 6 g/kg absolute humidity) of this source model was calibrated to 12 µg/(m²_{FAh}), the median floor area specific formaldehyde emission rate obtained in a monitoring study in 10 almost new low-energy houses in France (Guyot et al. 2015).

Co-simulation

The co-simulation was organized very simplistically in a so-called “ping-pong” method, i.e. the two tools calculated alternately the full simulation period. A Matlab script was developed to automatize and monitor the simulation and convergence progress. The simulation and assessment period was limited to a winter period of two months (January and February) to speed up computation. This period can be considered the most critical time in terms of IAQ, which is the main focus of this simulation study. Each BES simulation run included a one month long pre-calculation period to ensure that initial conditions have no impact on the assessment period. The alternating simulation cycle was started with a CONTAM simulation. Its post-processed results for interzonal airflows were provided in form of an input file for the subsequent DynBil simulations. The results of this

BES simulation, were post-processed to provide an input file for next CONTAM simulation. Specifically, for each zone, the air node temperature and the temperature of the top layer of the discretized floor construction was provided as input for the entire simulation period. After a minimum of five cycles the root-mean-square of the residuals of zone temperatures and interzonal flows results were below 0.01 K and 7% of the flow value which was considered sufficiently accurate. At that point the concentration results from CONTAM were used to evaluate IAQ.

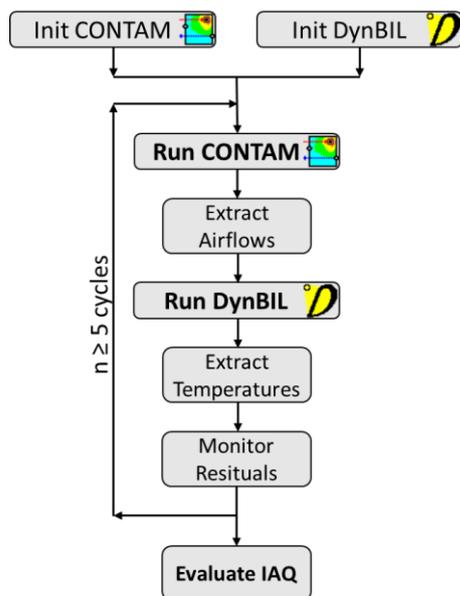


Figure 6: Simulation scheme for the presented “ping-pong” co-simulation

Indoor Air Quality (IAQ) Assessment

The resulting IAQ was assessed according to the methodology developed within Subtask 1 of IEA project EBC Annex 68 (Abadie and Wargocki 2017). This assessment method is implemented in a spreadsheet based calculation tool (with VBA macros) which will be freely available under <https://www.iea-ebc-annex68.org/>.

Therein, three IAQ indices are proposed. The IAQ-STEL (short-term exposure limit) index evaluates the risk associated with short-term exposure. It quantifies the frequency of exceedance of the exposure limit value (ELV) for short term exposure of the respective pollutant. The other two indices evaluate the risk associated with long-term exposure. The IAQ-LTEL (long-term exposure limit) index is calculated as the ratio of the average pollutant exposure over the ELV for long-term exposure. The IAQ-DALY index evaluates the long term exposure using disability adjusted life years (DALYs) (Logue et al. 2012).

Within this paper, the long-term exposure to formaldehyde and PM_{2.5} is evaluated using the IAQ-LTEL and IAQ-DALY index. Furthermore it compares the ventilation concepts by quantifying the IAQ-STEL index for CO₂. Note, that CO₂ concentrations around the ELV is solely used as a proxy for IAQ.

Table 1: Long-term and short-term exposure limit values (ELV) for selected pollutants from IEA EBC Annex 68 (Abadie and Wargocki 2017)

POLLUTANT	LONG-TERM ELV	SHORT-TERM ELV
Formaldehyde	9 µg/m ³	123 µg/m ³
PM _{2.5}	10 µg/m ³	25 µg/m ³
CO ₂	-	1000/1250 ppm

SIMULATION RESULTS

Figure 7 quantifies the formaldehyde exposure applying the IAQ-LTEL and the IAQ-DALY index. The first compares the simulated average formaldehyde exposure to the recommended long-term exposure limit value (ELV) while the latter quantifies the disability-adjusted life years. Note that guideline values for formaldehyde differ substantially throughout the world and that only a few countries define a long-term exposure guideline or exposure limit value (Abadie and Wargocki 2017). Short-time guideline values range from e.g. 100 µg/m³ (30 minutes average; Austria) to 9 µg/m³ (8 hour average; California). The herein used long-term ELV is based on the strictest available value applicable in California.

One can see that in the bedroom all four ventilation concepts can keep the average concentrations during occupancy (night-time) around or below the ELV of 9 µg/m³ with the active overflow concept having the highest value. In contrast, it has the lowest LTEL index in the living room. Here, the extended cascade ventilation concept shows the highest exposure value. This is due to the fact that the living room is ventilated via overflowing air from the bedrooms only, resulting in the lowest total air exchange rate of all four concepts for this ventilation concept. A very similar ranking between the different ventilation concepts can also be observed when looking at the DALY index (Fig. 7 b).

Figure 8 applies IAQ-LTEL and IAQ-DALY index to assess PM_{2.5} exposure. It shows the benefit of ventilation concepts with ambient air filtration. As the extract air system draws unfiltered air through the openings (“trickle-vents”), the exposure to PM_{2.5} from outdoor sources is notably higher, in this simulation case. Note that ambient particulate matter concentration was modelled constant with a PM_{2.5} concentration of around 40 µg/m³, representing a medium polluted city on an international scale and not

necessarily the air pollution in Vienna. The measured yearly average in Austrian cities has been slowly declining from 15-20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ to 10-15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ over the last decade (Buxbaum and Nagl 2018).

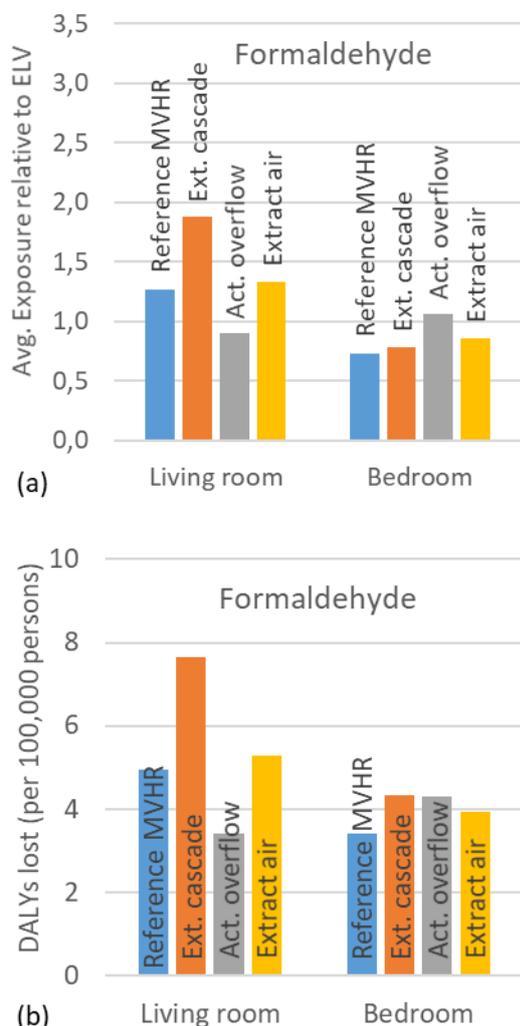


Figure 7: Simulated formaldehyde exposure in living room and bedroom evaluated with (a) the long-term exposure limit index (IAQ-LTEL) and (b) the DALY index (IAQ-DALY). See text for details.

Again, the ranking between the ventilation concepts is independent of the applied assessment index. When comparing the health impact of formaldehyde and $\text{PM}_{2.5}$ one can see that, for the simulated conditions, the exposure to $\text{PM}_{2.5}$ should be considered more relevant, in particular when looking at the values of the DALY index (see Fig. 7b and 8b).

The assessment in terms of short term exposure, i.e. counting the exceedance of the short-term exposure limit value by applying the IAQ-STEL method, shows that all four ventilation concepts perform well. No exceedance is recorded for any of the investigated pollutants (formaldehyde, $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} and CO_2). When applying a stricter ELV value for CO_2 as

proposed in (Cony Renaud Salis et al. 2017), i.e. 1000 ppm vs 1250 ppm, the extract air concept results in an exceedance in 33% of the occupancy hours in the bedroom vs. 0% for the other three ventilation concepts. The simulation shows no exceedance in the living room. This merely reflects the fact that the extract air ventilation concept is somewhat less effective in supplying the air into the bedroom, as a substantial portion of the overall air supply happens through (uncontrolled) envelope leakages. As a consequence, simulated bedroom CO_2 concentrations regularly peak around 1100 ppm in the bedroom. This only slightly higher than for the other concepts.

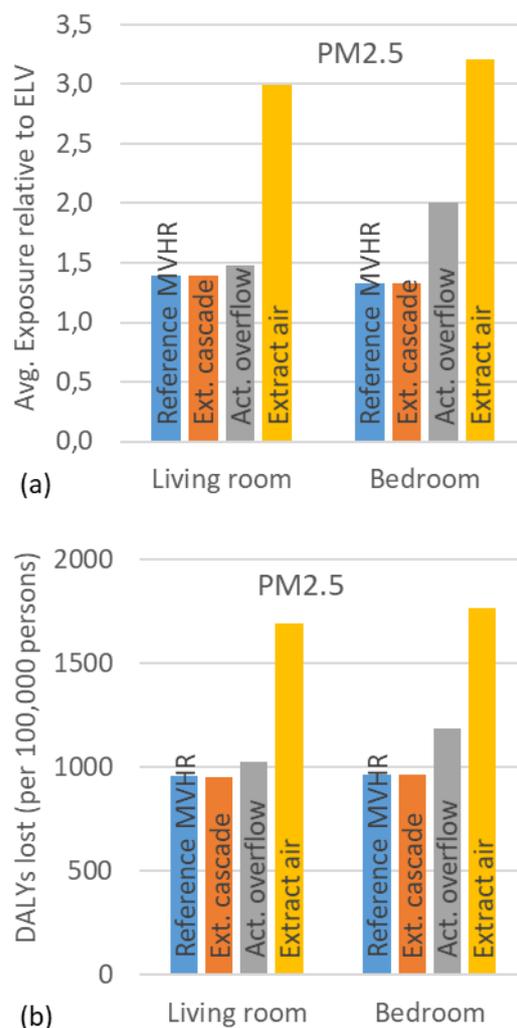


Figure 8: Simulated particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$) exposure in living room and bedroom evaluated with (a) the long-term exposure limit index (IAQ-LTEL) and (b) the DALY index (IAQ-DALY). See text for details.

CONCLUSION

The results show that the investigated ventilation concepts perform well compared to the reference MVHR or an extract air ventilation (EAV) system.

They outperform the extract air system for PM_{2.5} exposure due to the use of ambient air filters (Figure 8). An exception is the formaldehyde exposure in the living room. Here, slightly higher formaldehyde concentration can be expected with the extended cascade principle, due to the reduced total air exchange rate. However, the exposure to bioeffluents does not notably increase for this “supply air effective” ventilation concept as the short-term exposure evaluation of the CO₂ concentration remains at 0% compared to 33% for the extract air ventilation (when applying the stricter 1000 ppm threshold). The active overflow concept is less effective in terms of ventilation efficiency compared to a cascading ventilation, as it mixes the air between all rooms (except extract air rooms). The total air exchange has to be set higher than for the other systems, potentially leading to a lower indoor air humidity in winter.

The presented work made use of a simple co-simulation method to study the performance of different ventilation concepts, including two innovative concepts aiming at reducing ductwork. The focus of this paper was the assessment of IAQ, particularly for formaldehyde, particulate matter and CO₂. The indoor sources were modelled in detail, including temperature- and humidity-dependent formaldehyde sources and size-dependent particle sources and sinks. The results confirm previous studies identifying these ventilation concepts as promising solutions for cost and space effective implementation of MVHR systems. The applied methodology was developed to a great extent within the IEA EBC Annex 68.

ACKNOWLEDGEMENT

This study was performed within the project IEA EBC Annex 68 as part of the IEA Research Cooperation on behalf of the Austrian ministry for transport, innovation and technology.

REFERENCES

- Abadie, Marc, and Pawel Wargocki. 2017. *Indoor Air Quality Design and Control in Low-Energy Residential Buildings- Annex 68 | Subtask 1: Defining the Metrics AIVC Contributed Report 17*.
- Abdullahi, Karimatu L., Juana Maria Delgado-Saborit, and Roy M. Harrison. 2013. “Emissions and Indoor Concentrations of Particulate Matter and Its Specific Chemical Components from Cooking: A Review.” *Atmospheric Environment* 71:260–94.
- ASHRAE. 2005. “Airflow around Buildings.” *ASHRAE Fundamentals* 16.1 ff.
- Buxbaum, Iris, and Christian Nagl. 2018. *Ultrafeine Partikel, Black Carbon - Aktueller Wissensstand*. Wien.
- Cony Renaud Salis, Louis, Marc Abadie, Pawel Wargocki, and Carsten Rode. 2017. “Towards the Definition of Indicators for Assessment of Indoor Air Quality and Energy Performance in Low-Energy Residential Buildings.” *Energy and Buildings* 152:492–502.
- Deng, Qinqin, Xudong Yang, and Jianshun Zhang. 2009. “Study on a New Correlation between Diffusion Coefficient and Temperature in Porous Building Materials.” *Atmospheric Environment* 43(12):2080–83.
- Dols, W. Stuart, and Brian J. Polidoro. 2015. *CONTAM User Guide and Program Documentation Version 3.2 - NIST Technical Note 1887*.
- Fraefel, Rudolf. 1999. *Die Wohnungslüftung Im MinEnergie Haus, Planungshilfe Für Baufachleute*. Zürich.
- Guyot, Gaëlle, Adeline Bailly, Anne-marie Bernard, Gabrielle Perez, Sophie Coeudevez, Sandra Berlin, Enora Parent, Alexis Huet, Sylvain Berthault, Romuald Jobert, Damien Labaume, Guillaume Ferrier, and Sandrine Justet. 2015. “Ventilation Performance and Indoor Air Pollutants Diagnosis in 21 French Low Energy Homes.” in *AIVC Proceedings*. AIVC.
- De Jonge, Klaas. 2018. “The Impact of Demand Controlled Ventilation on Indoor VOC Exposure in Belgian Dwellings.” University Ghent.
- Kolarik (Ed.), Jakub, and Gabriel Rojas (Ed.). 2020. *IEA EBC Annex 68 - Subtask 4 - A Guide through Innovative Solutions, Current Challenges, and Selected Case Studies on Indoor Air Quality, Ventilation Design and Control in Residences*.
- Lai, Alvin C. K., and William W. Nazaroff. 2000. “Modeling Indoor Particle Deposition from Turbulent Flow onto Smooth Surfaces.” *Journal of Aerosol Science* 31(4):463–76.
- Liang, Weihui, Mengqiang Lv, and Xudong Yang. 2016. “The Combined Effects of Temperature and Humidity on Initial Emissible Formaldehyde Concentration of a Medium-Density Fiberboard.” *Building and Environment* 98:80–88.
- Liu, De Ling, and William W. Nazaroff. 2003. “Particle Penetration through Building Cracks.” *Aerosol Science and Technology* 37(7):565–73.
- Logue, J. M., P. N. Price, M. H. Sherman, and B. C. Singer. 2012. “A Method to Estimate the Chronic Health Impact of Air Pollutants in U.S. Residences.” *Environmental Health Perspectives* 120:216–22.

- PHI. n.d. "DYNBIL DYNAmische Gebäude Energie-BILanzen." Retrieved October 24, 2018 (https://passipedia.de/planung/energieeffizienz_ist_berechenbar/dynamische_simulation).
- Ploss, Martin, and Tobias Hatt. 2016. "Modellvorhaben KliNaWo - Klimagerechter Nachhaltiger Wohnbau." Pp. 8–59 in *economicum*.
- Riley, William J., Thomas E. McKone, Alvin C. K. Lai, and William W. Nazaroff. 2002. "Indoor Particulate Matter of Outdoor Origin: Importance of Size-Dependent Removal Mechanisms." *Environmental Science and Technology* 36(2):200–207.
- Rojas, G., M. Spörk-Duer, D. Venus, A. Greml, L. Krissmer, and R. Pfluger. 2015. *Lüften Und Heizen in Passivhäusern in Österreich*. Vienna.
- Rojas, Gabriel. 2019. "Ambient Air Filter Efficiency in Airtight, Highly Energy Efficient Dwellings – A Simulation Study to Evaluate Benefits and Associated Energy Costs." Pp. 920–31 in *40th AIVC Conference*.
- Rojas, Gabriel, Woody Delp, and Brett C. Singer. 2018. "Testing Recirculating Cooker Hoods – Can Their Filter Reduce (Ultra) Fine Particle Loads during Cooking?" Pp. 623–26 in *International Passivhaus Conference*, edited by W. Feist. Passive House Institute.
- Rojas, Gabriel, Rainer Pfluger, and Wolfgang Feist. 2016. "Ventilation Concepts for Energy Efficient Housing in Central European Climate – A Simulation Study Comparing Indoor Air Quality, Mould Risk and Ventilation Losses." in *Indoor Air 2016*. ISIAQ.
- Ruprecht, Jaenicke. 1993. "Tropospheric Aerosols." Pp. 1–31 in *Aerosol-Cloud-Climate Interactions*, edited by P. Hobbs. Academic Press.
- Shi, Bingbing. 2012. "Removal of Ultrafine Particles by Intermediate Air Filters in Ventilation Systems - Evaluation of Performance and Analysis of Applications Ventilation Systems." Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- Sibille, Elisabeth, and Rainer Pfluger. 2015. "The Use of Active Overflow Systems for the Distribution of Fresh Air in Apartments." Pp. 407–12 in *19th International Passive House Conference*, edited by W. Feist. Darmstadt, Germany: Passive House Institute.
- Sibille, Elisabeth, Gabriel Rojas, Mattias Rothbacher, R. Pfluger, and H. K. Malzer. 2013. "'Doppelnutzen' - Komfort- Und Kostenoptimierte Luftführungskonzepte Für Energieeffiziente Wohnbauten [Final Report: Extended Cascade Ventilation - 'Double Use']".
- Wallace, Lance A., Steven J. Emmerich, and Cynthia Howard-Reed. 2004. "Source Strengths of Ultrafine and Fine Particles Due to Cooking with a Gas Stove." *Environmental Science and Technology* 38(8):2304–11.
- Xiong, Jianyin, Wenjuan Wei, Shaodan Huang, and Jinping Zhang. 2013. "Association between the Emission Rate and Temperature for Chemical Pollutants in Building Materials: General Correlation and Understanding." *Environmental Science and Technology* 47(15):8540–47.
- Zukowska, Daria, Gabriel Rojas, Esfand Burman, Gaele Guyot, Maria del Carmen Bocanegra-Yanez, Jelle Laverge, Guangyu Cao, and Jakub Kolarik. 2020. "Ventilation in Low Energy Residences – a Survey on Code Requirements, Implementation Barriers and Operational Challenges from Seven European Countries." *International Journal of Ventilation* 0(0):1–20.

TRANSITION FROM INDOORS TO OUTDOORS – APPROACHES TO MODELLING THE EFFECT ON THE HUMAN THERMAL STATE

M. Rida¹, S. Hoffmann¹ and A. Ganji Kheybari¹

¹Faculty of Civil Engineering, TU Kaiserslautern, Kaiserslautern, Germany

ABSTRACT

Building occupants move between zones in a building and between outdoors and indoors several times during the day, exposing the body to multiple step-changes in its thermal environment. This phenomenon has never been studied in building simulation tools before. The thermo-physiology, sensation and comfort tool PhySCo coupled with ESP-r was used to simulate two typical warm and cold days. Two different methods to represent the outdoor environment were used and the effect of the dynamic movement of occupants on their thermal comfort has been studied. The results showed that moving from a hot environment to a cooler one requires more time to reach thermal steady-state compared to moving from cold to neutral.

INTRODUCTION

Our thermal environment is usually transient and non-uniform even in a well-conditioned building, since the building occupants move between different areas of the building and between indoors and outdoors. For example, from an unconditioned zone into a conditioned one or from a hot or cold outdoor environment to indoors.

Under a sudden change in the ambient conditions, the human body reacts to cope with the changes in the heat balance to preserve the neutral core temperature of around 37 °C. A detailed and dynamic physiology model is needed to account for the transient environmental changes and the accompanied thermo-physiological response.

Solar radiation plays a major role in the energy balance of the human body. Consequently, the solar heat gain on the body has been studied for many years, and several models have been proposed from very simple to advanced methods (Blazejczyk et al. 1993).

Höppe (2002) addressed the different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. When moving from a comfortable indoor environment to a cold environment the human body may require several hours to reach a steady-state. Whereas when moving to a hot environment, a steady-state may be reached within 30 minutes only. Since a steady-state thermal comfort model cannot provide realistic assessments

under cold and hot conditions, a transient model is required.

Several indices have been proposed in the literature to evaluate the thermal conditions of humans in the outdoor environment. The two most used nowadays are the Physiological Equivalent Temperature (PET) and the Universal Thermal Climate Index (UTCI).

The PET, introduced by Höppe (1999), is defined as “the air temperature at which in a typical indoor environment the heat balance of the human body is maintained with core and skin temperatures equal to those under the conditions being assessed”. It allows a person to compare the integrative effects of complex outdoor thermal conditions with an indoor experience.

The UTCI which is based on an advanced thermo-physiological model of human temperature regulation (Fiala et al. 2010) was set to achieve a climatic index applicable for an extremely hot and cold environment. The method used the Dynamic Thermal Sensation DTS model, which can predict the human overall thermal sensation. It is a function of the rate of change in the skin temperature and the core temperature based on a regression analysis.

The main purpose of using a building simulation tool is to study the energy performance of a building and the occupant thermal comfort. The outdoor thermal environment is complex and using the hourly weather data from the weather file is not an accurate way to study the outdoor human thermal comfort. It is, however, acceptable as a simplified way to project the thermal state of the building occupants.

The detailed human physiology and thermal comfort model PhySCo, which has been presented in several research papers (Boudier et al. 2016, Ganji et al. 2018, Boudier et al. 2019), shows a robust prediction of the thermal perception. PhySCo has been fully implemented in ESP-r for detailed indoor thermal analysis.

This paper is the first approach that uses building simulation combined with an integrated physiological model to study the effect of the occupant outdoor-indoor transition on thermal comfort. The paper also describes the method of assessing the outdoor thermal environmental parameters and compares two different methods of calculating the mean radiant temperature (MRT) on projecting the outdoor thermal comfort.

METHODOLOGY

PhySCo

PhySCo is a human thermo-physiology model based on the Tanabe's 65 nodes model (2002) and the Berkeley model (Huizenga 2001). The model is constituted of 16 body parts (head, back, chest, pelvis, shoulders, arms, hands, thighs, legs, and feet) where each body part has four concentric layers (bone, muscle, tissue, and skin) in addition to a central blood node (Stolwijk 1971, Tanabe et al. 2002, Huizenga et al. 2001). Hoffmann et al. (2012) added the effect of direct and diffuse solar radiation through complex fenestration. The model handles asymmetric environments and transient conditions and considers personal parameters such as clothing value (clo) and activity level. The physiology model is combined with the thermal sensation and comfort model of Zhang (2003). The model predicts local sensation and local comfort based on local skin temperatures and core temperature. The overall sensation and comfort reflect the overall thermal state of an occupant. (Boudier et al. 2016, Hoffmann and Boudier 2016)

PhySCo has been integrated with the building simulation tool ESP-r (ESRU). ESP-r was selected for this study because it is research-oriented, accurate, dynamic, and open-source (Clarke 2001). Figure 1 sketches the coupling process and the parameters exchanged. The coupling of ESP-r with PhySCo comprises the implementation of a control logic of centralized HVAC and decentralized personal comfort systems depending on thermal comfort and local thermal sensation values (Boudier and Hoffmann 2019).

The occupant clothing ensemble adaptation is a function of the environmental changes, the current perception, and the perception history. This was applied using PhySCo in Rida and Hoffmann (2019) which is based on the model of Schiavon et al. (2013). Ganji et al (2018) developed the (Wo)Man in Cube approach for local MRT calculation.

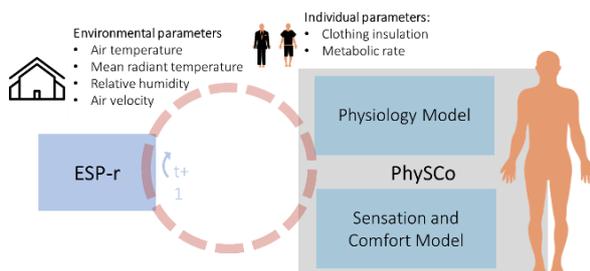


Figure 1: Schematic of PhySCo and ESP-r coupling.

Dynamic clothing model

The dynamic clothing model developed in Rida and Hoffmann (2019) has been updated to account for the outdoor winter clothing ensemble. The outdoor winter clothes are defined with a high insulation value resulting in a total clo value of 1.8 clo. The clothes distributed over the whole body define a person

wearing a winter outdoor jacket on top of the indoor winter clothing based on the International Standard Organization (ISO-7730).

The outdoor winter outfit is considered only in the cases when the occupant is set to be outdoors and the dry-bulb temperature is less than 14 °C. When the dry-bulb temperature is higher than 14 °C, clothing was selected from one of the four indoor clothing ensembles (summer, spring, autumn and, winter) (Rida and Hoffmann 2019).

In the sensation model of PhySCo, the neutral setpoint temperatures for the winter outdoor clothing have been updated. The neutral set points can be defined as the local skin temperature distribution at steady-state of a corresponding neutral environmental condition. Each combination of clothing and metabolic rates has different neutral environmental conditions based on Zhao et al. (2010).

Indoor environmental parameters

Indoor air temperature

The air temperature distribution is considered uniform over the human body parts and equal to the dry-bulb temperature of the air node of the corresponding zone.

Indoor Mean radiant temperature

Using the (Wo)Man in Cube approach, local MRT can be calculated for each body part. In ESP-r a pre-defined sensor of three boxes with 14 surfaces defines the human body location inside a zone. The ray-tracing method used to calculate the view factor and consequently, the radiant temperature of the surfaces of the imaginary boxes. By using a pre-defined set of view factors (considering the human posture), the local body MRT is calculated. The pre-defined view factors between the surfaces of the imaginary box and the human body surfaces (243 surfaces) were calculated using the software view3D. Figure 2 shows a representation of the (Wo)Man in cube approach used for view factor calculation in addition to the heat exchange between the human and its environment.

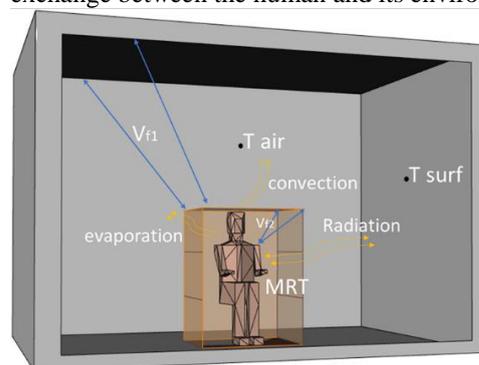


Figure 2: Representation of the (Wo)Man in cube approach for view factor and heat exchange with surroundings.

Indoor air velocity

The indoor air velocity is considered constant and uniform with a value of 0.1 [m/s].

Relative humidity

The relative humidity is considered uniform over the human body parts and is equal to the relative humidity of the air node of the corresponding zone.

Outdoor environmental parameters

Outdoor air velocity

The outdoor air velocity is calculated based on the equation provided by Kuttler (2000) equation (1).

$$V_h = V_{ref} \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^a \tag{13}$$

$$a = 0.12 * Z0 + 0.18 \tag{2}$$

Where V_h [m/s] is the air velocity at a certain height h [m] and V_{ref} [m/s] is the air velocity measured at the height h_{ref} [m]. In our case, we estimated that $h_{ref} = 10$ [m], which represent the high of the weather station, estimating that the data was measured at a height of 10 [m], and the V_{ref} is the air velocity given from the weather file. The air velocity required for our calculation is to be taken at a height of 1.1 [m] above the ground, representing the centre of the human body.

The roughness exponent a is calculated from equation (2). Where $Z0$ is the roughness length in [m]. Table 1 presents some typical values for this coefficient taken from Kuttler (2000).

Table 1: Roughness exponent for different locations.

LOCATION	ROUGHNESS EXPONENT (a)
Outer city and open area	0.16
Low-dens suburb	0.28
Densely built-up urban area	0.4

Outdoor MRT modelling approaches

Two different methods were used in the modelling process:

Method 1 uses a separate outdoor zone in which MRT from the (Wo)Man in cube approach could be considered.

Method 2 uses the weather data to calculate the outdoor MRT without defining a zone.

Method 1: Outdoor MRT using the (Wo)Man in Cube approach (with an outdoor zone)

Modelling the outdoor space as a thermal zone by representing the surrounding outside surfaces of a building, allows us to use the (Wo)Man in Cube approach to calculate the outdoor MRT. The bottom surface of the zone representing the ground with a corresponding ground temperature profile. The inner surface of the ground represents a pavement where its thermal characteristics are presented in Table 2.

Table 2: Thermal characteristics of the outdoor ground layer (pavement).

MATERIAL CHARACTERISTIC	VALUE
Conductivity [W/m.K]	1.4
Density [kg/m³]	2100
Specific heat [J/kg.K]	653
Ir emissivity [-]	0.9
Solar absorptivity [-]	0.65

The top and the open sides are considered as fictitious layers with a transmissivity of 0.99 and solar absorptivity of 0.01.

A very high infiltration rate of 30 air changes per hour is considered to reach outdoor conditions.

Method 2: Outdoor MRT from weather data (without outdoor zone)

In this approach, we tend to adopt a simplified method to calculate the outdoor MRT using the weather data as dry-bulb temperature and solar radiation based on the equation taken from Jendritzky (1990). No outdoor geometry is needed for this approach.

The outdoor mean radiant temperature index is given by Jendritzky (1990) in equation (3) can be described as follows:

$$MRT = \left[\left(\varepsilon T_i^4 + \frac{(1-a)(I_{dif} + I_{ref})}{\sigma} + 273.15 \right) + \frac{(1-a)f_p I_{dir}}{\varepsilon \sigma} \right]^{0.25} - 273.15 \tag{3}$$

where T_i is the temperature of the surfaces around the human (in this study we assume it to be equal to the air temperature in [°C].), ε is the emissivity of the radiating surface and is equal to 0.95, σ is the Stefan-Boltzman constant equal to 5.7×10^{-8} [W/(m²K⁴)], a is the mean albedo of skin and clothing and is equal to 0.33, I_{dir} , I_{dif} , I_{ref} are the intensity of direct, diffuse and reflected solar radiation on a horizontal surface r [W/m²], f_p is the projected area and it can be calculated from equation (4) according to Jendritzky (1990).

$$f_p = 0.308 \cos \left[h \left(0.998 - \frac{h^2}{50000} \right) \right] \tag{4}$$

where h is the sun altitude.

SIMULATION

The two methods of outdoor MRT calculation have been considered and compared. Figure 3 shows the model setup using Method 1 where the outdoor is modelled as a defined zone, the top corner of figure 3 shows an elevation sketch of the setup. Figure 4 shows

the model setup using Method 2 for calculating the outdoor MRT and air temperature is taken directly from the weather file.

In both Figures 3 and 4, the location of the (Wo)Man in Cube sensors is shown.

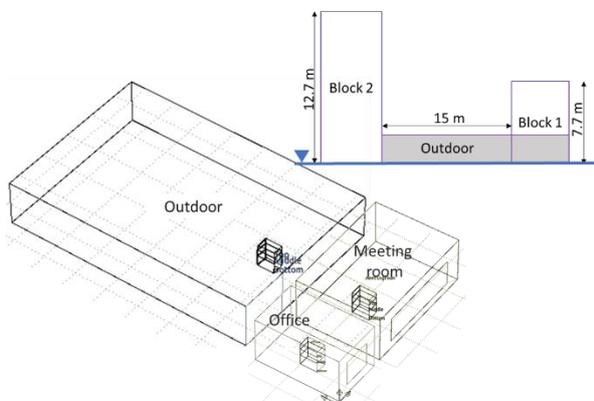


Figure 3: The (Wo)Man in Cube location based on Method 1.

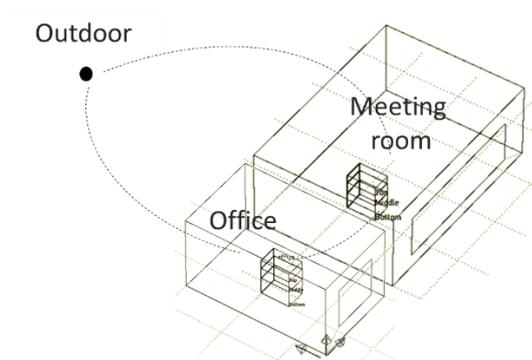


Figure 4: Simulation setup based on Method 2.

Figure 5 is a flow chart showing the model algorithm inside the building simulation ESP-r based on the pre-defined occupant location. If an outdoor zone is constructed the location of the human body needs to be defined as in Method1, otherwise the Method2 is applied. Environmental parameters are calculated like MRT and sent to PhySCo.

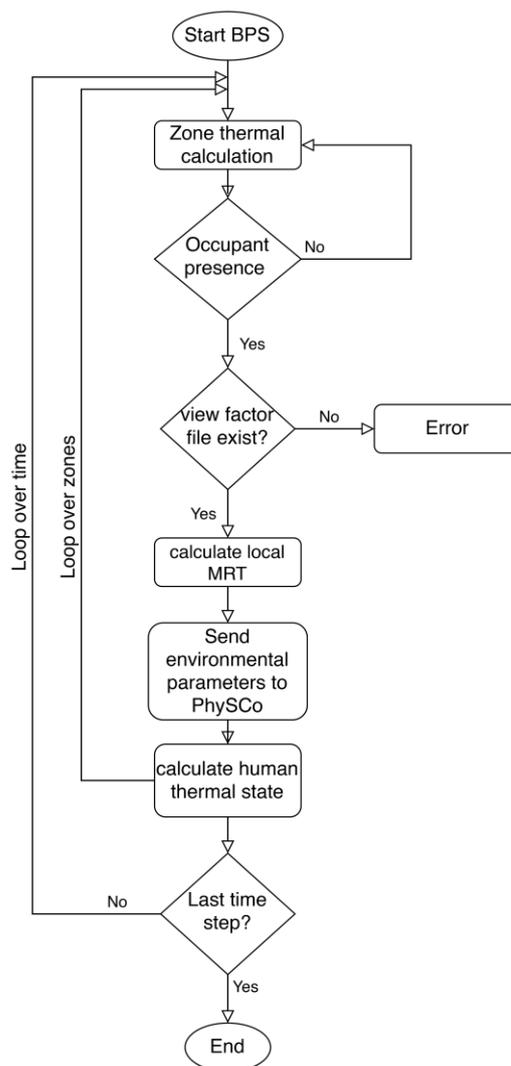


Figure 5: Application flow chart

We simulated a case where the occupant moves between three different thermal environments including outdoors (Figure 6).

Room geometry

The model setup can be described as:

- An office room with a floor area of 15 m² and a south facing window of 2.4 m².
- A meeting room with a floor area of 35 m² and a window area of 7.5 m².
- An outdoor zone of 15 m distance between Block 1 and Block 2.
- Block 1 is 7.7 m high and Block 2 is 12.7 m high.

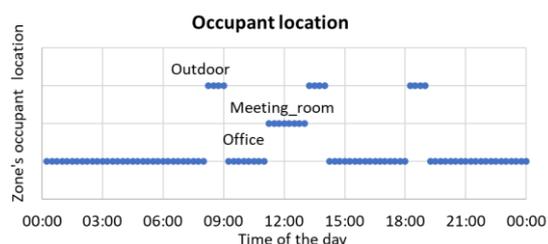


Figure 6: Occupant locations during the simulations

The U values of the different construction types in the two zones, office and meeting room are presented in Table 3.

Table 3: thermal characteristics of the construction surfaces in the office and meeting rooms.

Construction	U-value [W/m ² K]
Floor	0.15
Ceiling	0.33
External wall	0.38
Internal walls	1.46
Windows	1.08

Setup

The weather data of the city of Mannheim (Germany) were selected for this study. The office zone was conditioned to 24 °C and the meeting room to 20 °C in terms of operative temperature, by using a basic controller.

The occupant spends three hours in the outdoor zone distributed over the day at 8, 13, and 18. Another two hours of the day, between 11:00 and 13:00, the occupant is located in the meeting room, and the rest of the time the occupant is in the office room.

Simulations were conducted over a random day of June and January to represent a hot and cold day respectively. The climate in Mannheim is classified as warm temperate (Cfb) according to Köppen-Geiger classification. The summer season occurs from May to August and the winter season occurs from November to February.

Results

Figure 7 shows the results for a summer day in June using Method 1 and Figure 8 shows the same day for Method 2. (a) shows the air temperature, (b) shows the MRT for a selected body part, (c) represents the air velocity, (d) shows the total clothing insulation value for the different time of the day, (e) shows the local skin temperature, (f) presents the overall thermal sensation and thermal comfort of the occupant.

Similarly, Figure 9 presents the results for a cold winter day in January using Method 1, and Figure 10 shows the results data from a simulation of the same day but using Method 2 for outdoor thermal environmental conditions.

Discussion

From the results presented in Figures 7 and 8 (a), we can see the differences in the dry-bulb temperature between the two different methods. Method 1 showed a higher air temperature, since it is the outdoor air zone node temperature, compared to Method 2 where the dry-bulb temperature is taken directly from the weather file. The differences are due to the enclosed outdoor zone, even though a high air change rate was considered.

The major differences can be seen in the MRT calculation. Method 1 uses the (Wo)Man in Cube approach in an outdoor zone without considering direct solar radiation. However, solar radiation still hits the person and its surrounding surfaces through

the fictitious walls. MRT in Method 2 shows higher values due to the consideration of the direct solar radiation affecting the MRT (see Equation 3). Moreover, the MRT is uniformly distributed over the whole body in Method 2 as Figure 8 (b) shows during the outdoor phase.

The differences in the environmental parameters cause the dynamic clothing insulation model to predict different values (Figures 7 to 10 (d)). For example, Figure 8 (d) shows higher clothing insulation during the first hour outdoor and that is due to the lower dry-bulb temperature using Method 2. The outdoor velocity in both methods uses the same equation. Because of that, similar results of air velocity can be seen in both methods (Figures 7 and 8 (c)).

When comparing the results from the two methods on a cold winter day (Figures 9 and 10), only small differences can be found on the environmental parameters due to the very low outdoor air temperature. The main difference can be seen in MRT prediction. Even with very low solar radiation, MRT showed higher values between 13:00 and 14:00. This elevated MRT yield a slight increase in the overall sensation in Figure 10 (f) and skin temperature in Figure 10 (g). In this example, the importance of considering the direct solar radiation in simulation can be seen.

The overall sensation and comfort results in (f) show how human thermal perception varies when moving between different thermal environments. Also, comparing Figures 7 and 8 (f) and 9 and 10 (f), it can be seen how MRT and consequently the solar radiation can enormously influence the comfort prediction.

The results also show that moving from the outdoor to indoor zone in a hot summer day requires around one hour for the body to reach thermal steady-state. Which can be expressed by either the skin temperature or the sensation values. On the other hand, for the case of moving from cold winter day to indoor, it requires around 45 minutes for the body to reach thermal steady-state, even though the temperature and air velocity difference was greater compared to the hot case.

CONCLUSION

In this paper, we modelled the thermal comfort of the occupant moving between different environments during a day using a combination of the detailed human thermo-physiology, sensation and comfort model PhySCo and the building simulation tool ESP-r. This co-simulation approach allows us to understand and project the outdoor thermal perception of the building occupant. Moreover, the paper presented and evaluated two methods for considering the outdoor thermal environment surrounding the human. The outdoor environmental parameters can be simplified if no outdoor zone is applicable by using the weather data provided. In this method, the simplified uniform MRT considers the direct solar radiation on the human. On the other hand, when an outdoor zone is defined, the outdoor environmental parameters were

defined using a specific zone. This method allows using the (Wo)Man in Cube approach to calculate local MRT by considering a ray-tracing method for long-wave radiation.

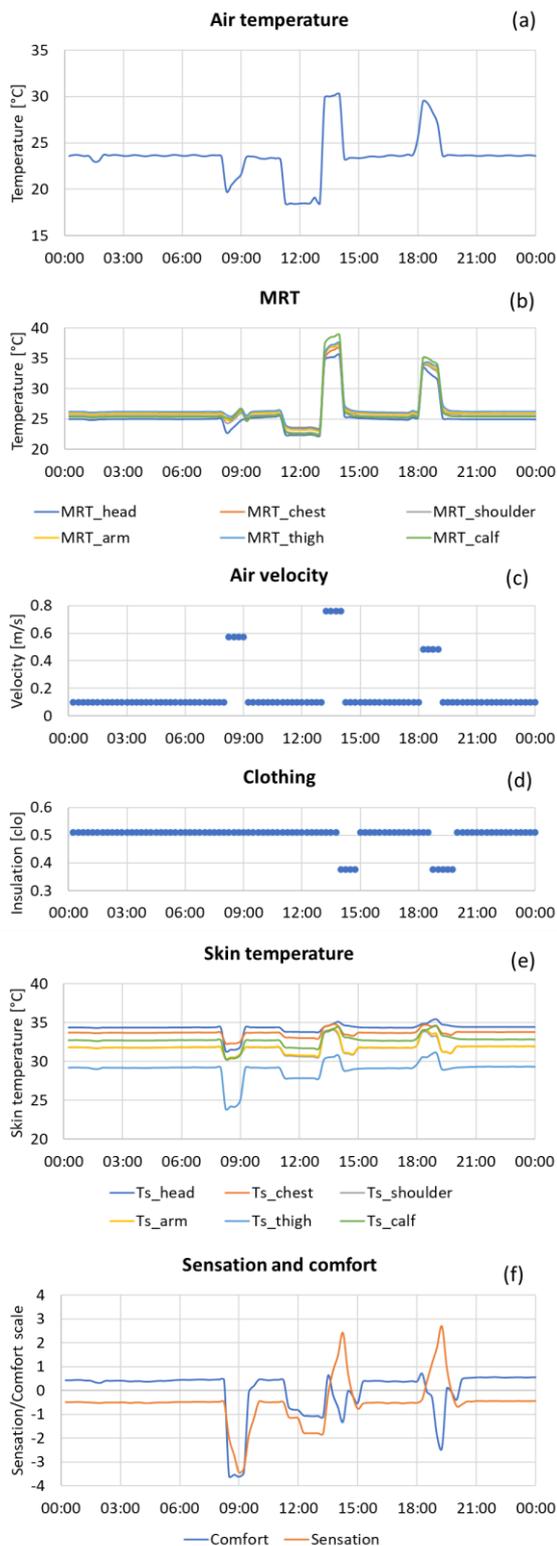


Figure 7: Results for a summer day in June with outdoor zone, (a) air temperature, (b) MRT, (c) air velocity, (d) clothing insulation, (e) skin temperature and (f) sensation and comfort.

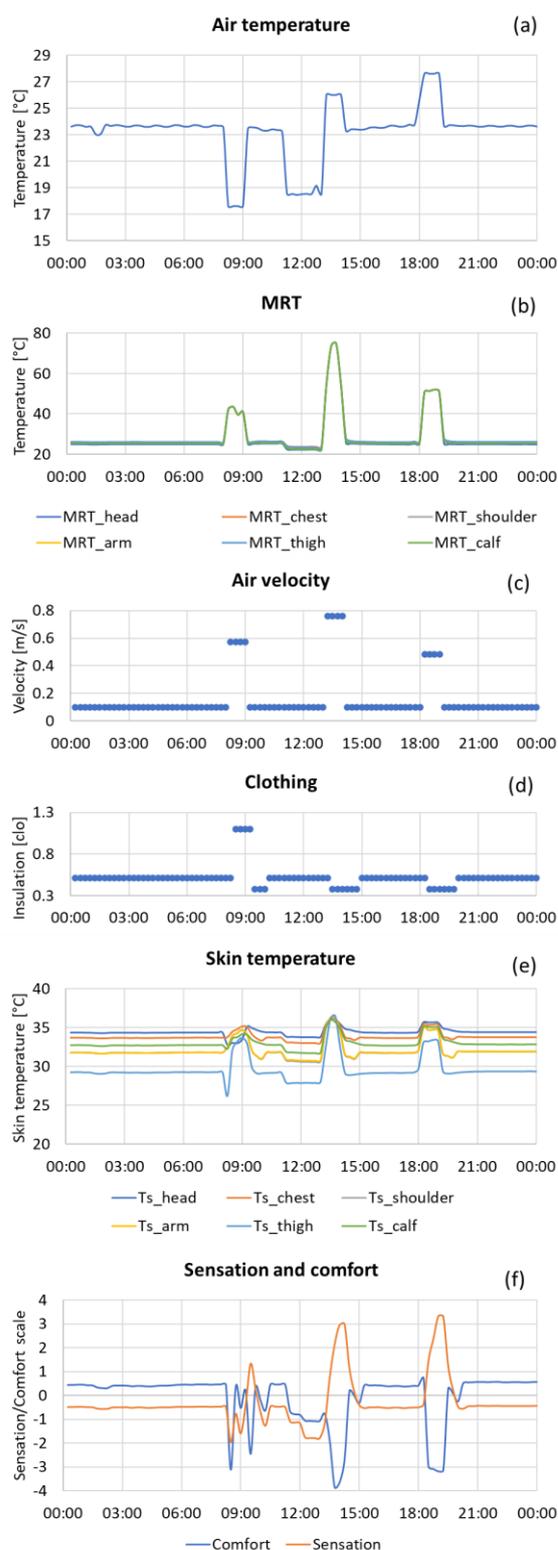


Figure 8: Results for a summer day in June without the outdoor zone, (a) air temperature, (b) MRT, (c) air velocity, (d) clothing insulation, (e) skin temperature and (f) sensation and comfort.

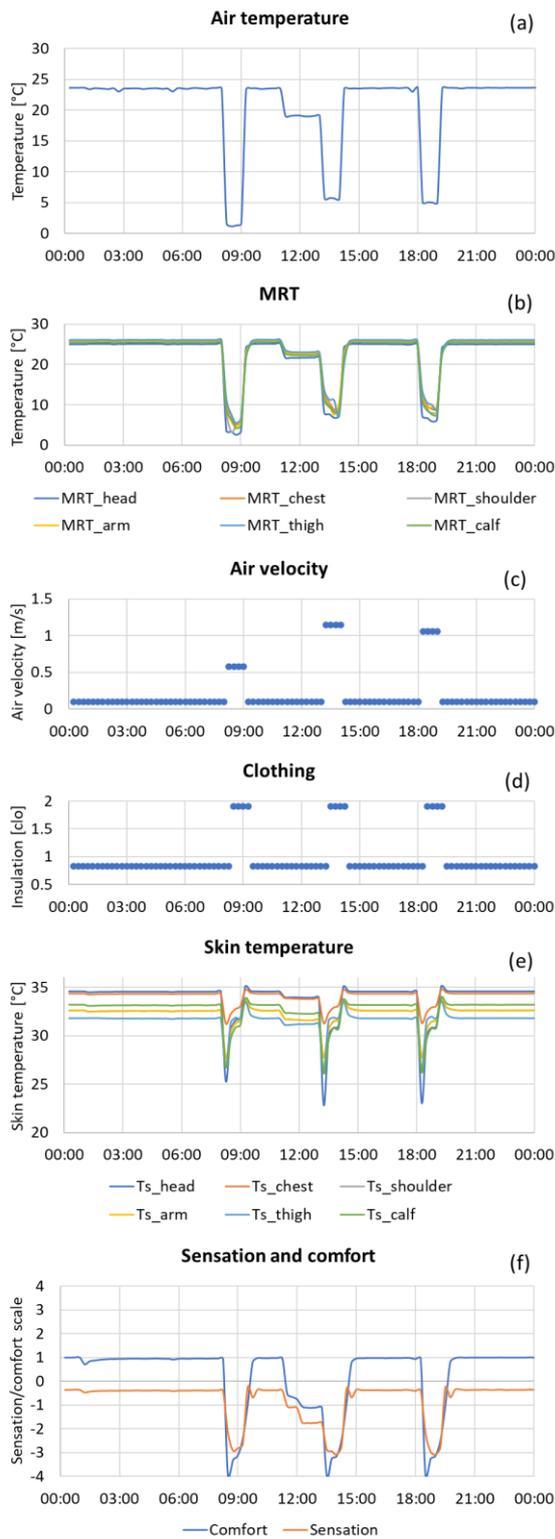


Figure 9: Results for a winter day in January with outdoor zone, (a) air temperature, (b) MRT, (c) air velocity, (d) clothing insulation, (e) skin temperature and (f) sensation and comfort.

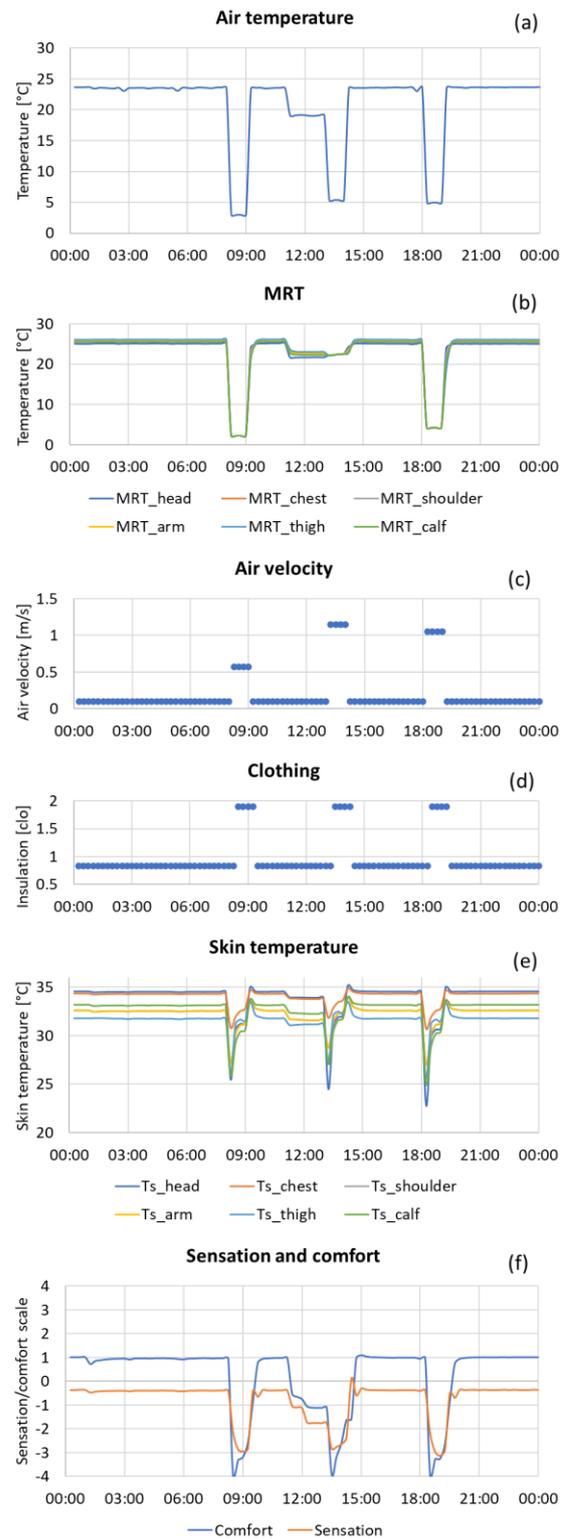


Figure 10: Results for a winter day in January without the outdoor zone, (a) air temperature, (b) MRT, (c) air velocity, (d) clothing insulation, (e) skin temperature and (f) sensation and comfort

These two methods allow us to evaluate the effect of detailed outdoor geometry consideration and direct solar radiation on the human body. The results also showed that the thermal state of the building occupant is transient and the human body requires some time to reach thermal steady-state when step-changes in the environmental conditions occurs.

However, more research on this topic needs to be undertaken, the authors intend to improve the way outdoor environmental parameters are assessed in building simulation for outdoor thermal comfort, especially for the MRT calculation and the consideration of solar radiation. Moreover, a comparison with existing experimental results is planned to validate the approach.

In future investigations, it might be possible to use an occupant behaviour model for movement and presence by generating a realistic occupancy schedule.

REFERENCES

- Boudier, K., Fiorentini, M., Hoffmann, S., et al. 2016. Coupling a thermal comfort model with building simulation for user comfort and energy efficiency 2016 in Central European Symposium on Building Physics (CESBP) and BauSIM, Dresden.
- Boudier, K., Hoffmann, S. 2019. Modeling decentralized systems for energy savings based on detailed local thermal comfort calculations 2019 in IBPSA, Rome.
- Clarke, J. A. 2001. Energy simulation in building design. Routledge.
- ESRU, <http://www.esru.strath.ac.uk/applications/esp-r/> (01.04.2020)
- Fiala, D., Havenith, G., Bröde, P., Kampmann, B., & Jendritzky, G. 2012. UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 429-441.
- Ganji K. A., Boudier K. and Hoffmann S. 2018. Using a "MRT Manikin" to assess local and overall thermal sensation and comfort. 2018 in BauSIM, Karlsruhe.
- Höppe, P. 2002. Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy and Buildings*, 34(6), 661-665.
- Höppe, P. 1999. The physiological equivalent temperature—a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 71-75.
- Huizenga, C., Hui, Z., & Arens, E. 2001. A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments. *Building and Environment*, 36(6), 691-699.
- Hoffmann, S., Boudier, K. 2016. A new approach to provide thermal comfort in office buildings—a field study with heated and cooled chairs. In IAQVEC 2016, 9th International Conference on Indoor Air Quality Ventilation & Energy Conservation In Buildings.
- Hoffmann, S., Jedek, C., & Arens, E. 2012. Assessing thermal comfort near glass facades with new tools. 2012 Building Enclosure Science & Technology, BEST 3 conference. Atlanta (USA).
- Iso, International Standard Organization 7730: 2005. Ergonomics of the thermal environment—Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.
- Jendritzky, G. 1990. Bioklimatische Bewertungsgrundlage der Räume am Beispiel von mesoskaligen Bioklimakarten. *Akad f Raumforsch u Landesplanung*, 114, 7-69.
- Kuttler, W. 2000. Stadtklima. In: *Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxologie*, Band 1B: Atmosphäre (Hrsg.) Guderian R, Springer Verlag, pp 420–47
- Rida, M., Hoffmann, S., 2019. Using a Dynamic Clothing Insulation Model in Building Simulation – Impact on Thermal Comfort and Energy Consumption. 2019 in IBPSA, Rome.
- Schiavon, S., Lee, K. H. 2013. Dynamic predictive clothing insulation models based on outdoor air and indoor operative temperatures. *Building and Environment*, 59, 250-260.
- Stolwijk, J. A. 1971. A mathematical model of physiological temperature regulation in man. NASA Contractor Report, NASA CR-1855. Washington, D.C.
- Tanabe, S. I., Kobayashi, K., Nakano, J., Ozeki, Y., & Konishi, M. 2002. Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD). *Energy and Buildings*, 34(6), 637-646.
- Zhao, Y., Zhang, H., Arens, E. A., & Zhao, Q. 2014. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part IV: Adaptive neutral setpoints and smoothed whole-body sensation model. *Building and Environment*, 72, 300-308.
- Zhang H. 2003. Human thermal sensation and comfort in transient and non-uniform thermal environments. Ph.D. thesis, Berkeley: University of California, 2003, p. 43.

A NEW TOOLSET FOR A HOLISTIC EARLY STAGE PARAMETRIC LCA STUDY

C. von Raven¹ and C. Frenzel¹

¹Transsolar Energietechnik GmbH, Stuttgart, Germany

ABSTRACT

The climate crisis raises the question whether energy targets of building regulations should be more holistic by considering also embodied energy of materials. While focusing on thermal and daylight user comfort in order to reach ambitious energy and greenhouse gas targets simulation tools must efficiently and more holistically guide the planning process starting in the early design phases when the major decisions are made. The sensitivity of various parameters also needs to be studied to find the most appropriate solution.

In this case-study embodied energy of materials based on the Ökobaudat are calculated for a low-tech office building using Grasshopper and Rhinoceros. In parallel, dynamic thermal building and system simulation are applied with TRNSYS 18 and Radiance in a parametric multizone building model. Both variants are put into one context with various lifespans. In total up to 100 years are analyzed to indicate the highest energy consumers for optimization.

INTRODUCTION

Political targets for reduction of greenhouse gas emissions are given by the European Union in steps for 2030 and 2050. The key target for 2030 is to cut of at least 40% in greenhouse gas emission compared to 1990 and a change to total net-zero greenhouse gas emissions in 2050 (European Commission, 2020). The building industry constitutes a major source of global greenhouse gas (=GHG) emissions (IEA, 2019). In the past decades a focus on energy efficiency for heating, cooling and electricity was the consequent answer to the problem of high energy consumption of buildings. In combination of a widely non-renewable energy mix this consumption led to immense GHG emissions. Nowadays the efficiency of energy systems and quality of building envelopes of new built structures are highly maximized. Also, the energy mix of electricity is changing towards a primarily renewable energy supply. Thus, we can see an increasing importance of the energy embodied in the structure itself (i.e. Röck, M. et al., 2020). Aiming for net zero buildings by 2050 a far-reaching rethinking in the building sector must be achieved. By understanding the main factors of a building contributing to the

overall greenhouse gas emissions, appropriate design decisions can be taken. For this, it is necessary to extend the considered system boundary from conventional energy analysis towards an overall life-cycle assessment.

Life cycle assessments (=LCA) is a tool that depicts the embodied energy of products by describing »the environmental and climate-related effects of a product during its entire life cycle – from the extraction of raw materials to the production of the materials, the manufacturing of the product, its usage through to all processes at the end of the product life cycle.« (Ökobaudat, 2019)

The intendend is to consider not only one building material product, but the building as a whole, with the processes of construction and demolition, renewal of individual components, operational energy and other aspects. These impacts have to be evaluated and compared. The buildings performance legitimizes the buildings construction, thus has to be optimized by evaluation of comfort in parallel. Computer modeling and simulation software can accomplish the connections between these aspects and the building design.

In this paper a new approach of holistic building impact and performance analysis is described targeting to efficiently guide the planning process for carbon net-zero buildings from the early beginning. The aim is to detect major sources of greenhouse gases in order to efficiently reduce the overall GWP of a building and getting a deeper sense for the consequences of different building materials and assemblies in combination with the building performance.

METHODOLOGY, BOUNDARY CONDITIONS, SIMULATION MODELS

Methodology

For the LCA of this case study data of the Ökobaudat 2020 was used for calculation of embodied energy of the building. This is complemented with the simulation results for the energy demand by applying dynamic thermal building and system simulation with TRNSYS 18 in a parametric multizone building model using TRNLizard for Rhinoceros and Grasshopper.

Thermal and visual (daylight) comfort analysis were carried out to well inform the design process.

The basis for the life cycle assessment is provided by DIN EN ISO 14040 and DIN EN 15804. These standards define the structure of a building's life cycle split into the modules A to C, the modules of production (A1-A3), construction (A4-A5), use (B1-B7) and end of life (C1-C4). Each of these modules are subdivided for example in production of raw material supply (A1), transport (A2) and manufacturing (A3). Benefits by recycling and reuse of certain materials or products are not allowed to be considered in the LCA, but can be described as additional information by module D.

The indicators for the negative environmental effects are defined by the DIN EN 15804 and include the global warming potential (GWP), total use of renewable primary energy resources (PERT) and the total use of non-renewable primary energy resources (PENRT). These indicators were all considered, but this case study focusses on the GWP.

For the first module of manufacturing (A1-A3) the data provided by Ökobaudat for each building material was applied. The modules A4 and A5 address the construction on site, including transport. For a first overview the data provided by the Ökobaudat was used as far as available. Additional information on transport and process energy on the construction site (e.g. heavy machinery and heating) can be included as generic data provided by the Ökobaudat, but was not considered here.

In this case study the usage phase of a building distinguishes between the use of the materials and the energy demand for operation. The material-based modules are defined by the DIN EN 15804 as use, maintenance, repair, replacement, refurbishment (B1-B5). Missing data of these modules led to the approach to consider the replacement of individual materials due to their individual limited lifetime. This data was substituted by multiplying the available life cycle data for the modules A and C of the materials that has to be replaced within the period of consideration. For example: cement screed flooring has to be renewed after 50 years. In a life cycle assessment over a span of 100 years, the manufacturing, construction and end-of-life data for a material is taken into account a second time in module B-material. The information on the materials individual lifetimes were provided by the BBSR 2017 and compared with the French dataset Inies 2020. For mechanical systems life spans were taken from the VDI 2067:2012.

The operation of the building requires energy for electricity, heating and cooling. This operational energy is described in the module B6 as the result of the dynamic thermal building and system simulation with TRNSYS 18. The required water supply is described in the module B7 and was not considered in this case-study.

The end of life modules (C1-C4) were provided by the Ökobaudat database. As for construction, the data for demolition and transport can be supplemented with generic data on processes provided by the Ökobaudat, but were not considered in this case-study.

The recycling potential (Module D) can be also analyzed and additionally be depicted as further information within the type of diagram used in this study. This can help to evaluate additional positive aspects of certain building structures and materials but was also not considered in this case-study.

The concept of the life cycle modules defined by the DIN EN 15804 serves as the basis for the selected type of results diagram. The sunburst diagram adopts the modules in a circular arrangement as shown in Figure 1 for a point in time. This diagram gives a proportional weighting for each module, the respective components and materials that can be seen in the chapter "Results". In addition, a sequence chart visualizes the increase of the overall global warming potential of the building over a life span of 100 years, subdivided in different materials, respectively in types of energy demand.

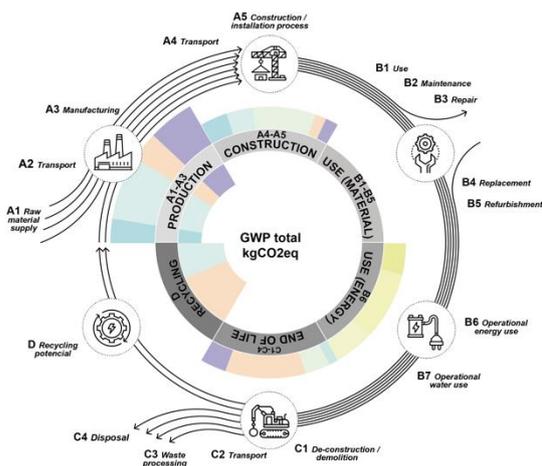


Figure 1: Life cycle assessment and visualization approach based on DIN EN 15804

Boundary Conditions

The approach in this case-study was to analyze the 100 years life cycle of a monolithic light concrete office building with reduced materials and systems (here called low-tech) and compare it to a passive house structure and ventilation system. The aim was to find out the optimums for planning a fully functional and comfortable building with minimal ecological footprint.

The system boundary was set on the global warming potential and energy consumption of a building considering operational and embodied energy. Therefore, other environmental impacts like toxicity, change of land use, impact on microclimate etc. were not considered.

The low-tech approach is based on the idea to minimize the complexity of the building aiming for a maximum of resilience, durability and adaptability by reducing the number of different building materials and supporting user interactions. The passive performance is maximized to minimize the demand for active systems. Few but durable building materials minimize the need for renovation. Passive solutions for thermal comfort and ventilation are complemented by individual controlled systems that are easy to handle and simply convertible to the current needs over the lifetime of the building. The studied low-tech solution has a monolithic façade which is made of lightweight concrete, fulfilling most of the requirements for statics and insulation considering a U-value of 0.35W/(m².K). Concrete cap ceilings are complemented with sand on top to increase thermal capacity. The pitched roof is made of lightweight concrete and covered with PV. The active system of this solution considers heating devices and exclusively passive natural ventilation supported by ceiling fans. Fresh air supply is considered due to manual operable windows in the façade. Night flushing in combination with an adequate window fraction, opening areas and thermal mass provide summer comfort.

This low-tech monolithic structure is compared to a standard passive-house structure in hybrid wood-concrete construction. Passive house standards aim for minimized operational energy demands regarding heating, cooling and electricity. Comparing the relevance of operational energy to the embodied energy for materials in the building structure the LCA was carried out for a passive house structure and compared to the low-tech structure. Heating demand is low due to the waste heat usage in both cases, with 12.4 kWh/(m².a) for the light concrete building and 6.4 kWh/(m².a) for the passive house. Cooling demand is in both cases quite similar at 3 kWh/(m².a). Electricity consumption for building operation and plug loads in the light concrete variant is 21.8 kWh/(m².a) vs the passive house with 25.8 kWh/(m².a) not considering the electricity for the servers.

The choice of wood as building material should give an understanding on the different global warming potentials of wood and concrete based structures in contrast. This alternative variant fulfils the passive house standard in Germany. It combines concrete floors with wooden façades and wooden roof structure, the latter covered with PV. The mechanical system for this passive house considers an integrated decentral ventilation unit with heating, cooling and high-efficient heat recovery. Manual window ventilation for day flushing is also considered.

The total building operation energy numbers in the results charts consider artificial lighting, computers, pumps, fans, servers, heating and cooling. The window to wall ratio is 20%. The office spaces are planned to be open-space offices, with an average

occupation density of 13m²/person including meeting rooms and single offices. Windows have no external movable shading device, but are positioned on the inner façade side. The architectural form and window sizing is optimized by parametric study to provide adequate solar protection and keep daylight levels appropriate. As glare protection manual interior devices will be provided on demand. Artificial lighting is provided using LED and a peak power of 10W/m² plus manual ON/OFF control is considered. Computers are considered with an average electrical power of 120W/workplace. Servers of 3kW electricity consumption are integrated in the cores next to the restrooms. During appropriate times this internal heat gain is used within 400m² office space, which results in a specific heating power of 7.5 W/m². The 100% annual electricity consumption of the servers is considered in the total annual energy numbers for electricity. As weather data the TRY 2015 dataset for Heidelberg main station was applied. The windows allow for tilting or complete opening to provide night and day flushing. In the simulation model a stack ventilation model was considered. Sizing of openings are for night flushing 5 ACH and day flushing with 3 ACH. Within the office spaces ceiling fans are installed for comfort through accelerated air speed to allow for an operative temperature threshold increase of 3K in comparison to typical cooling setpoint temperatures for office spaces.

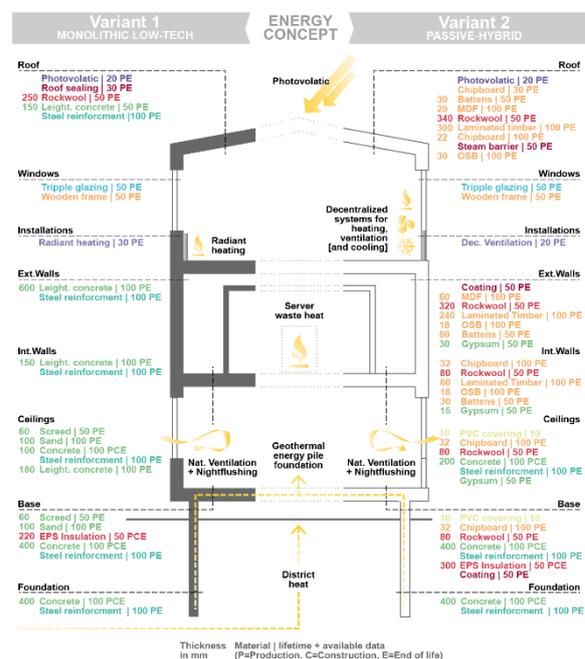


Figure 2: Individual material assemblies and climate concept for Variant 1 and 2 and Energy concept of both variants. The colors are based on material type and are corresponding to the analysis diagrams.

In both systems geothermal energy is used via activated pile foundations considering an EER of 5 for heating and EER of 4 for cooling. In addition the waste

heat generated by the server units within the office spaces are integrated as basic space heating. Photovoltaics on the entire roof is used to minimize annual electricity demands from the grid.

In this case-study two scenarios of PERT, PENRT and GWP throughout the analysis period were considered regarding the fraction of renewable energies. In the first scenario the static factors according to building code DIN 18599 were applied continuously throughout all the years. In the second scenario the constant increase of the overall renewable energy supply fraction from the grid was considered to reflect political renewable energy targets predicted by a BMU study of 2011.

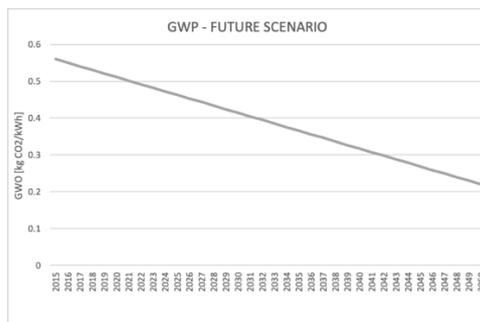


Figure 3: GWP change factor of German energy-mix for electricity

Grasshopper Tool

The boundary conditions described are gathered and merged using a 3D Rhinoceros model as interface between the spatial design and a Grasshopper toolset. This toolset gives a more user-friendly interface to assign material information from the Ökobaudat or other sources to the geometrical information of a 3D Rhino model. A parametric model is set up linking all detailed construction material definitions for embodied energy assessment in combination with thermal and daylight simulation via TRNLizard. Based on this thermal comfort, daylight quality, shading effects and energy consumption are directly linked with embodied energy in materials to determine the information for the LCA. The toolset allows to

assign layers into an assembly and link this information to geometrical surfaces. At the end massing is summed up according to various aspects like single materials, phases, assemblies, etc. that gives the opportunity to analyze more precise sources of higher energy demands.

The building elements are considered as suggested by the simplified calculation method according to the DGNB 2018. (exterior walls including doors and windows; roof; floors/ceilings including floor construction and coverings; base plate including floor construction and coverings; foundation; interior walls and doors; heating, cooling and ventilation; other technical building installations (e.g. photovoltaic))

All these building elements were initially modeled as 2D surfaces without thickness. The LCA tool uses the areas from the Rhino-model and combines them with the information applied within the Grasshopper tool, which in this case makes use of the Ökobaudat dataset. For this, detailed sections of each building assembly are needed. The selection of every material in each assembly is necessary. The indicator data of these materials are selected from the Ökobaudat dataset or can also be individually defined according to more specific manufacturer information and other databases as desired. Information on layer thickness and lifetime per material are added. All this information is compiled and calculated for the LCA modules A1-A5, B1-B5 and C1-C4 as available. Simultaneously, the Rhino model is used for the TRNSYS simulation. The resulting data provides the energy demands for electricity, respectively heating and cooling used in the LCA module B6. The energy demand is converted into the global warming potential in kgCO₂eq.

The tool generates predefined dynamic plots to show in a sequence the impacts over the 100 years analysis period. Specific lifetimes can be analyzed in depth by a sun burst chart indicating the weight of materials per assembly and phases. Grid based daylight analysis and thermal comfort studies extend the life cycle assessment in visualizing the impact and performance of the building solution. The following Figure 4 shows the information workflow used for the integrated LCA in this study.

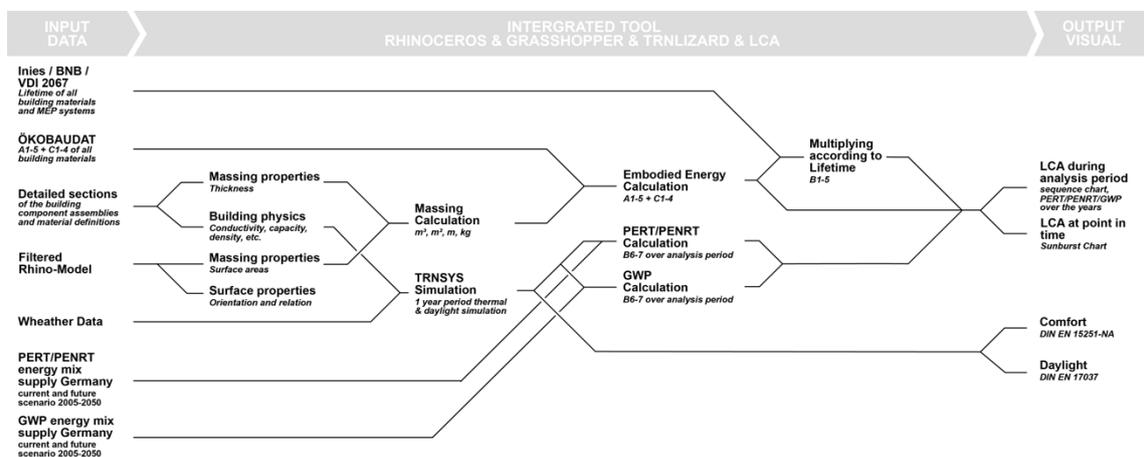


Figure 4: Workflow of integrated LCA tool for Rhinoceros and

RESULTS AND OPTIMIZATION

Thermal and daylight simulation

The two different cases described were analyzed for thermal comfort, daylight qualities and energy consumption. To make these different solutions comparable in regards to comfort and energy consumption it was assumed that in both cases the same summerly comfort limit according to the DIN 15251-NA are achieved by applying cooling and ceiling fan effects. By ceiling fans the comfort can be optimized according to the DIN 15251 standard, that allows to increase the upper threshold by 3K. In the following visualization this 3K was instead reflected by an operative temperature reduction of 3K to reach the solid red line. As worst case the ceiling fan cooling potential is considered in the low-tech variant as cooling energy. The following Figure 5 shows the resulting comfort.

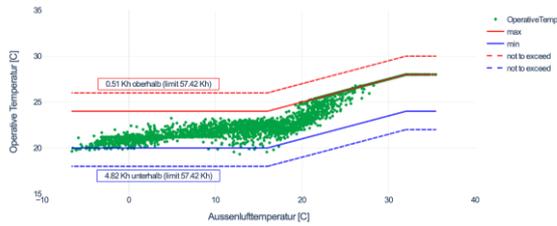


Figure 5: Thermal comfort results, Variant 1 (Low-tech monolithic light-concrete)

Daylight simulations were carried out considering the criteria for daylight autonomy of the DIN EN 17037: 2019. Neighboring buildings were considered and led to partly less daylight in the first floor along the façade, those spaces are not to be used as permanent working spaces. The windows were optimized to maximize daylight using a parametric study. In the first floor the results show that almost 89% of the whole floor area has more than 100lx and 68% is above 300lx, which fulfills daylight autonomy criteria. Further optimization can be achieved by increasing the window heights in the first floor.

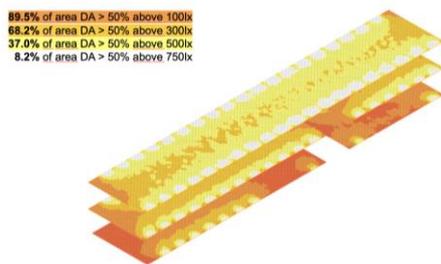


Figure 6: Daylight autonomy thresholds based on DIN EN 17037

Life Cycle Assessment

Life cycle assessments for both variants were performed. The following Figures 7 and 8 show sunburst diagrams for the low-tech light-concrete office building and the passive house wood-concrete-hybrid structure after 10 years (corresponding to the political targeted year of 2030). Colored by material or energy type corresponding to the concept drawing Figure 2, the diagrams visualize the impact of individual building components and materials for each life time module.

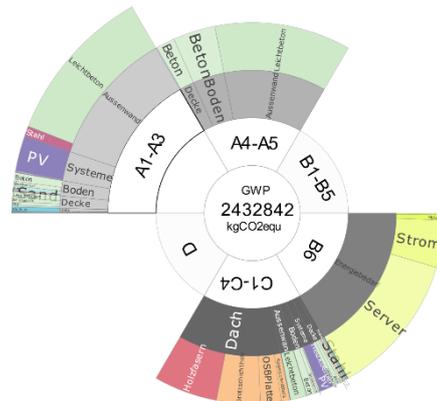


Figure 7: Variant 1 (Low-Tech) LCA after 10 years

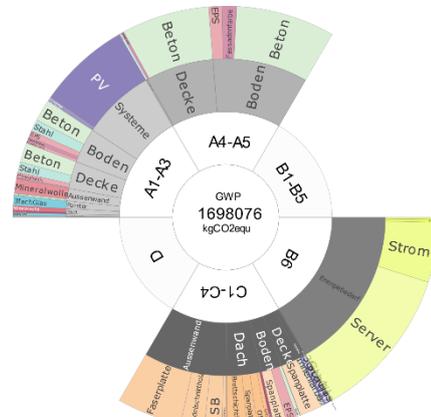


Figure 8: Variant 2 (Passive-Hybrid) LCA after 10 years

The first variant shows the highest GWP in the manufacturing stage (from cradle to gate) while the second variant’s manufacturing stage is playing an equal role to its end of life stage. This can be explained by the way the Ökobaudat data balances the carbon sink effect of wood. By giving wooden materials a positive credit for the stored CO₂ in the module A1 and equalizing it in the end-of-life phase, the dataset reflects the realistic assumption that greenhouse gas is stored in wooden materials until released at disposal.

The overall GWP during 10 years of the passive-wood structure is around 30% smaller than the monolithic lightweight concrete structure. The GWP of the construction phase and operational energy differ only slightly. The energy concept utilizing the waste heat generated by the server leads to a minimal heating demand. By this, the heat energy saving effects of the passive house are negated by the increased electrical fan power demand for ventilation. This makes the passive-house variant more resource-intensive in terms of operational energy compared to the low-tech variant. Thus, the 30% savings in GWP can be attributed to the embodied energy of the building materials. As it can be seen in detail for each building element, concrete and reinforcement are major contributors to the GWP. Important to mention is that the LCA data provided by the Ökobaudat are fragmentary for most materials. Especially, data on process energy used by transport to the construction site (A4-5) are rarely available as shown in the concept drawing Figure 2. E.g. only for concrete, EPS and painting data, on the construction phase was available. Thus, no final assumptions can be made. Data on the recycling potential are not calculated in this case-study but could describe further benefits for one variant or another.

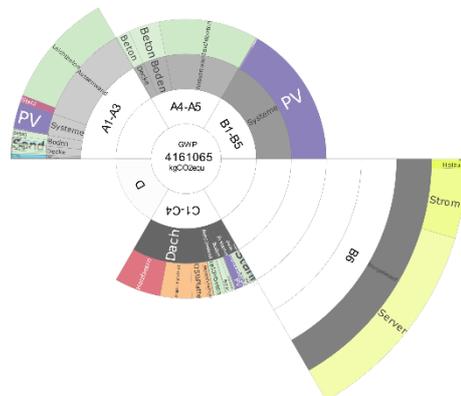


Figure 9: Variant 1 (Low-Tech) LCA after 30 years (2050)

After 30 years (corresponding to the political targeted year of 2050) some technical devices and photovoltaic modules have to be replaced (Figure 9). In addition, the operational energy demand summed up over the previous years and its weight increased. The positive effect of photovoltaic and the change of the German energy mix are not taken into account in these diagrams. Operational energy becomes now significantly more relevant. In order to reach the 2050 goals the hybrid structure of less embodied energy is preferable in this comparison. Due to the optimized energy concept, the building envelope in passive house standard does not bring significant improvements regarding operational energy but only increases the embodied energy of the structure. This

holistic energy consideration shows where large quantities of GWP can be saved: by reducing server electricity and the material consumption of the building envelope.

To understand the long-term impact of both variants Figure 10 and 11 show the global warming potential life span of 100 years. Coloured by material or energy type the diagram shows the increase of GWP over time due to cumulative energy consumption in a linear way and the energy embodied in replaced materials as plateaus. After an expected life time of 50 years the wooden structure has to be renewed to a large extent. This refers mainly to insulation and sealing materials which can be minimized with the monolithic construction variant. This shows that further discussion on long-term impacts of each structure is needed beyond the 2050 goals.

The sequence charts display the negative GWP value of energy generated by the installed photovoltaics. Operational energy demand is the major contributor to a rising GWP. Due to the short energy payback time of photovoltaics, the further generated power is contributing significantly to reduce the overall GWP in the considered lifespan. By replacing non-renewable energy from the standard german energy mix this greenhouse gas neutral system can be considered indirectly as positive by replacing worst-case energy supply from coal source.

By applying the second energy supply scenario with increasing renewable energy, the expected global warming potential due to the operational energy is minimized as shown in Figure 12. In this scenario, reflecting targets by the European Union, the GWP of operative energy demand becomes negligible in approx. 60 years. Embodied energy becomes main factor of interest to reduce the GHG emissions by the building.

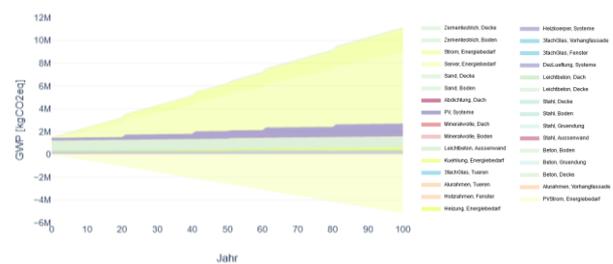


Figure 10: Variant 1 (Low-Tech) LCA study over 100 years life span; static energy mix

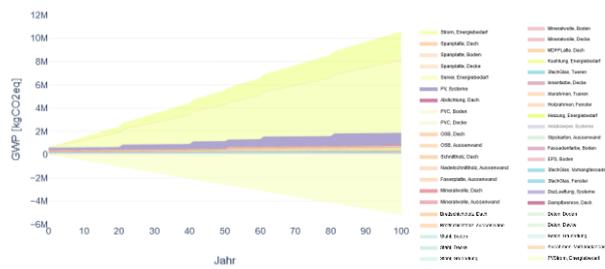


Figure 11: Variant 2 (Passive-Hybrid) LCA study over 100 years life span; static energy mix



Figure 12: Variant 1 (Low-Tech) LCA study over 100 years life span; dynamic energy mix scenario based on BMU study

DISCUSSION

This case-study shows how a more holistic analysis of a building at the early design stage can reveal potentials for improving building performance and reducing its impact. For example this case-study shows potentials like using server excess heat, that have to be seriously taking into consideration as part of integrated energy concepts. As energy consumptions are already at a very low level for new constructions the question of materials become more relevant. As this case-study shows, integrated low-tech solutions can be overall as performant as e.g. passive house systems with higher insulation levels. Robust solutions with longer lifespans can provide equal or even better performance. Also, in regards to rapid technological development, this could provide more freedom for architectural design not to be restricted by building services, as in common practice.

Also, this analysis of various parameters raises new questions we urgently have to address in view of the climate crises and the related political targets in reduction of GHG emissions to net-zero within the upcoming 30 years.

E.g. it becomes clear that embodied energy is crucial to address. The process of maximizing the share of renewable energy must be extended to the production and transportation of the materials. This is particularly true for energy power plants. As demonstrated in this study wooden buildings are by far not carbon neutral. The carbon is only stored for a certain life time and the positive effect of the carbon sink is linked to sustainable reforestation. Also, wooden structures need plenty of supporting materials to fulfill building

physic standards. The right balance of materials has to be evaluated individually.

This raises the question of sufficiency and an increased focus on refurbishment rather than supporting new construction. Analysis of refurbishment life cycle assessments have to be developed considering the previous lifetime of the reused building structure.

Generally, actual building energy efficiency codes need to be extended for LCA studies of embodied energy and define limits and standardized comparative methods aiming realistically for the 1,5°/2°C temperature target. These should consider the entire life-cycle and should not be limited on individual modules. As this case-study exemplarily shows, a simplified cradle to gate analysis does not represent reality exhaustively and could lead to counterproductive decisions. Using the Ökobaudat data set for a cradle to gate analysis would take an excessively positive view of wood-based structures.

Due to a lack of LCA data on the modules A4-A5, scope for further GHG emission reduction cannot yet be identified. In a next step information on transport ways of major materials is crucial for evaluating most effective ways to reduce the overall GWP of a building. E.g. recent research showed that the long-distance transport of a rammed earth construction is about 84% of the overall embodied energy and has a significant impact (Nanz, L. et al. 2019). The same applies to processes of construction and demolition on the site.

Information from manufacturers about embodied energy need to become mandatory in the technical product sheet and have to be added to databases like Ökobaudat. Also information on individual lifetime data for each product should be enhanced. In order to realistically analyze the holistic GWP of a building energy efficiency factors like the PERT, PENRT of the building code have to reflect the current energy mix and be more dynamic. Ideally that information should be updated annually, reflecting the trend for future scenarios considered in the LCA. Also, the effects of change of land-use should be analyzed, e.g. in the LCA module of construction. Further individual aspects that are not yet taken into consideration can make an enormous difference. e.g. building electronics meeting modern standards.

With respect on sufficiency the topic of comfort must be discussed openly and creatively as well. New technologies enable more individual, more local thermal comfort solutions. This may lead to radically new and more sufficient design approaches, that also should be analyzed and compared with such a dynamic and holistic tool.

Summarized, we see an urgent need for the availability of precise data and more realistic regulations to tackle and improve the real environmental impact of a building.

Moreover, we need a new culture on implementing these tools in projects. By using open source programs as Rhino and Grasshopper, as well as parametric modelling to integrate the complexity of many parameters into one tool, the presented approach addresses the problems on current use of LCA-tools in a large scale as shown by Jusselme, T. et al. 2018..

OUTLOOK

In a next step the comparison will be extended by analyzing the refurbishment of an office building with a heritage façade. In addition the integration of other databases alongside the Ökobaudat and the overall usability of the tool and the type of output plots will be improved incrementally.

REFERENCES

- BBSR 2017. Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen, https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/baustoff_gebauedaten/BNB_Nutzungsdauern_von_Bauteilen_2017-02-24.pdf
- BMU Leitstudie 2011, Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global.
- DGNB 2018. System- Kriterienkatalog Gebäude Neubau EN1.1 / Ökobilanz des Gebäudes. https://static.dgnb.de/fileadmin/dgnb-system/de/gebaeude/neubau/kriterien/02_ENV1.1_Oekobilanz-des-Gebaeudes.pdf
- DIN EN ISO 14040:2009-11, Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework
- DIN EN ISO 14044, Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines
- DIN EN 15251:2012 – Indoor Environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics.
- DIN EN 15804, Sustainability of construction works – Environmental product declarations – core rules for the product category of construction products
- DIN EN 17037:2019-03 – Daylight in buildings
- DIN V 18599-1:2011-12, Energetische Bewertung von Gebäuden
- European Commission 2020. https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies_en
- IEA 2019. Global Status Report for Buildings and Construction. <https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019>
- Inies Datenbank 2020. <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html>
- Jusselme, T. et al. 2018. Findings from a survey on the current use of life-cycle assessment in building design.
- Klein, S.A. et al. 2018. TRNSYS 18: A Transient System Simulation Program, SEL, University of Wisconsin, Madison USA
- McNeel, R. Rhinoceros (V6)
- Nanz, L. et. al, Impacts on the Embodied Energy of Rammed Earth Facades During Production and Construction Stages, JOURNAL OF FACADE DESIGN & ENGINEERING VOLUME 7 / NUMBER 1 / 2019
- Ökobaudat 2020. <https://oekobaudat.de/>
- Passivhaus-Bauteilkatalog, Details for Passive Houses: Ökologisch bewertete Konstruktionen, A Catalogue of Ecologically Rated Constructions 2009
- Röck, M. et al. 2020. Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation. Applied Energy 258
- TRY 2016, Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse
- VDI 2067:2012-09, Economic efficiency of building installations, Fundamentals and economic calculation
- Waltjen, T. et al. 2009. IBO Passivhaus-Bauteilkatalog | Details for Passive Houses: Ökologisch bewertete Konstruktionen | A Catalogue of Ecologically Rated Constructions, Auflage 3. ISBN 3211994963
- Ward, G. Radiance. <http://www.radiance-online.org/>

SENSITIVITY OF INPUT DATA IN BUILDING HEATING ENERGY DEMAND SIMULATION

A. Geiger¹, A. Nichersu¹ and V. Hagenmayer¹

¹Institute for Automation and Applied Informatics, Karlsruhe Institute of Technology,
Karlsruhe, Germany

ABSTRACT

In the present paper, the sensitivity of input parameters in heating energy demand simulation is analyzed, be it related to spatial model geometry, building physics, or occupant behavior. To this end, based on the standardized data model CityGML Energy ADE 2.0, input data is prepared and simulated with the open-source energy simulation tool EnergyPlus. Results illustrate a possible need to review energy data collection efforts. The parameters displaying the most significant impact during testing: the presence of a cellar, the infiltration rate, and occupancy behavior (setpoint temperature and heating scheduling) are generally omitted during mass data-gathering efforts.

INTRODUCTION

To assist world governments in achieving SDS (Sustainable Development Scenarios), the International Energy Agency documents the evolution of the building sector. According to their latest available report, released by Dulac et al. (2019), buildings are the source of 28% of global energy-related CO₂ emissions in 2018, if indirect emissions from upstream power generation are considered. It highlights two key areas, building envelope improvements and heating sources, as being behind on their improvement goals with fossil fuels still supplying more than 60% of the heating sources.

To tackle the great challenge of reducing building heating demand, simulation tools are used in the planning steps of buildings, district and city energy design and construction. These tools can be classified depending on the scale and number of buildings they simulate. Detailed individual Building Energy Models (BEM) is an established field that performs analyses of building stock at the level of a single building. Urban Building Energy Modeling (UBEM) deals with modeling dozens to thousands of buildings using bottom-up approaches. UBEM tools, standards, and paradigms have been identified in Reinhart and Cerezo Davila (2016) and are often simplified BEM tools that use streamlined workflows. Both BEM and UBEM expect the same parameters for an energy building simulation. These parameters, as classified by Benner et al. (2016), fall in the following categories:

- Geometrical parameters: building geometry and its geographic location in the real world;
- Building physics parameters: most importantly heat capacity and thermal transmittance of exterior building elements (walls, slabs, roofs) and optical properties of windows;
- Meteorological parameters: outside temperature, solar radiation, wind speed, humidity, cloud coverage;
- Usage profiles: the behavior of building occupants and profiles for heating, lighting equipment and ventilation.

In this context, Geiger et al. (2019) describe the usage of an open standardized data model CityGML with an extension to support energy-relevant information, CityGML Energy ADE. This standard is a common information model for the representation of cities and regions in 3D. Data are classified using classes and relations and provide users with the urban object's geometrical, topological, semantical, and appearance properties. Public authorities like the Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung in Germany provide CityGML data on a large scale. However, this data is generally not directly applicable to an energy simulation. In addition, energy-relevant parameters such as U-value are missing and, in most cases, geometric outer shells of buildings are not suitable for energy simulation without a-priori data treatment.

MOTIVATION

In both BEM and UBEM, the most important step prior to starting any energy simulation is the collection and treatment of data to create a digital twin. For Germany, 3D building models are provided almost nationwide by public agencies. Available in CityGML format, this data is georeferenced and describes a simplified outer shell. It typically only stores geometric information. Outer surfaces are classified into wall, roof, and ground slab. The geometry must be checked for compatibility with the energy modeling software.

Further information required for energy modeling such as construction year of a building, number of floors or type of building is generally not provided with the spatial model, and, when given, displays limited reliability. Other required parameters, related to building physics or usage profiles, are usually not provided. Due to this missing information in existing 3D city models, strategies are necessary to assess the missing information. Most often, statistical data related to construction year, occupancy, building type, and building physics is used. The present paper aims to determine the sensitivity of the individual parameters that constitute the simulation input.

For this purpose, an office building in Germany is considered. In the climate zone, Germany is part of, the by far largest component of energy demand for such a construction is heating. Hence, the present paper solely focuses on this component. The office building energy-related parameter values are known. A parameter sensitivity study is performed for multiple parameters in various simulation runs to provide justification for the information the data collection and treatment process need.

To this end, the original CityGML data is enriched with energy-relevant information and stored as CityGML Energy ADE dataset. In their review of the BEM field, Pezeshki et al. (2019) identify the open-source software package EnergyPlus as one of the most frequently used energy modeling software to date. Reinhart and Cerezo Davila (2016) catalog UBEM applications and their respective tools. They recognize EnergyPlus as a tool used in multiple applications. As both fields display widespread use of this tool, the present work performs all heating demand calculations with it. The software is released by the US Department of Energy and is described in detail by Crawley et al. (2001).

BACKGROUND

State of the art in sensitivity analysis of building thermal energy demand modeling

With regard to sensitivity analysis, Tian (2013) performs a literature review and divides existing techniques in global and local methods. Local sensitivity analysis is focused on the response of the tested algorithm around variations of a base case. Global sensitivity analysis targets the influences of uncertain inputs over the entire input space. Local sensitivity methods are applied extensively in building energy analysis as they have the added benefit of low computational time while providing answers that are easy to interpret. Global sensitivity methods bring the ability to explore the interactions between input parameters and allow for self-verification. Tian's review also shows that sensitivity studies generally focus on one single algorithm and tool.

In an evaluation of local (one parameter at a time OAT) and global (Sobol and Morris) sensitivity on a BEM method, Kristensen and Petersen (2016) conclude that local methods are capable of identifying the same cluster of the most important parameter as complex global methods. Limitations for local approaches only show when attempting to create a fine ranking of parameters. The simulation used to reach these statements was performed on an existing residential building stock in a temperate climate. Overall, this study indicates that the OAT method is sufficient for our purpose.

Three other sensitivity analysis studies were identified to be performed in temperate climates with similar BEM methods. In the first one, (Delgarm et al., 2018), the local sensitivity method is referred to as one-factor-at-a-time (OFAT). It uses EnergyPlus and a base model of a room. They conclude that for the thermal demand of a room, the parameter window size has the highest impact. In the second study, de Wilde and Tian (2009) simulate the energy demand for a fictional office building in the UK in a climate change scenario context. The results show that regarding the uncertainty in predicted heating energy, the dominant input factors are infiltration, lighting gain, and equipment gain. Lastly, in what is a comparable research study in an Italian context, Kalogeras et al. (2020) benchmark EnergyPlus and an Italian commercial tool, Edilclimad (based on energy performance ISO 13790 and Italian material norms UNI TS 11300) against each other. The base case is a private clinic located in Sicily, Italy. The tests conclude that for estimation of thermal building energy consumption, the most significant parameters are inner set temperature, availability, and efficiency of heat recovery systems and thermal transmittance.

In conclusion, in the previously identified sensitivity analysis studies, the most significant parameters were found to be window size, infiltration rate, user behavior, floor area, and thermal transmission (no ranking in order of presentation – different studies).

CityGML LOD concept and the Energy ADE

CityGML is an Open Geospatial Consortium (OGC) standard, representing a data model for virtual 3D cities. For spatial structure, the CityGML standard includes a concept of Level Of Detail (LOD) classified from 0 to 4, first presented in the specifications of the standard, Gröger et al. (2012), and further explored by Biljecki (2017). In short, LOD0 comprises a representation of footprints and optionally roof edge polygons marking the transition from 2D to 3D GIS without volumetric representations. Ensuing LODs are more elaborate in terms of geometry and semantic content. LOD1 is a model usually obtained by extruding a LOD0 model. LOD2 adds a simplified roof shape, with multiple semantic classes (e.g. roof,

wall) used to classify the building's outside surfaces. LOD3 entails a detailed architectural building model, which encompasses windows and doors, and is of higher complexity than previous levels. Finally, LOD4 elaborates indoor features while keeping the same outdoor features as LOD3.

Data in CityGML format provided by public agencies in Germany is usually derived from photogrammetric flights (aerial imagery and LIDAR). That means in general that the building is provided with the external hull, without information on the existence of a cellar, which lies beyond the reach of those two sensors types. This external hull is usually provided in LOD2, with higher levels of details being seldomly made available for public buildings.

One of the basic concepts of CityGML is the extension mechanism called Application Domain Extension (ADE). Using this mechanism, it is possible to extend the standard schema with new features and properties. Since the schema of CityGML does not support energy-relevant parameters, the CityGML extension Energy ADE was developed. It represents a "neutral" data model, which can be used as an interface between Building Information Modeling (BIM) tools and Geographic Information Systems (GIS) on the one hand, and building energy simulation tools on the other hand.

TESTING AND EVALUATION

Base case

For the simulations, an office building with research activities is used. It also incorporates a small share of usable space dedicated to laboratories. The building is located within Campus North of the Karlsruhe Institute of Technology, in a suburban spatial context.

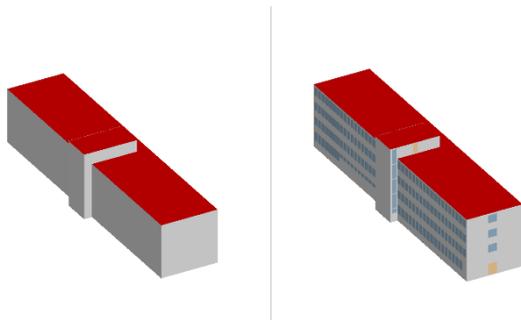


Figure 1: Building 445, base case for the sensitivity analysis

Figure 1 presents Building 445, in LOD2 (left) and LOD3 (right). In the following, the digital twin of Building 445 in LOD2 will be referred to as the base case. It will be used as a comparison to all other values. Building 445 has three fully-fledged floors. It also incorporates a semi-basement (an architectural term that defines a floor half below ground) and an extended stairwell into the roof.

With the Energy ADE, both detailed energy simulation of single buildings (BEM) and global estimation of energy behavior of multiple buildings (UBEM) are supported. For this purpose, the building is extended by extra attributes for building type and construction weight. Building objects are extended with energy-relevant parameters. In addition, elements for thermal zones and usage zones are defined. Thermal zones are bounded by thermal boundaries with the corresponding construction type (e.g. wall, roof). Thermal boundaries can have thermal openings and a reference to the used construction including physical properties. Usage zones are referenced by thermal zones and support schedules for heating, cooling, ventilation and internal gains due to occupants and technical equipment (Agugiaro et al., 2018), (Benner et al., 2016). The modeling of energy conversion, distribution, storage, and emission devices, and the energy flow between them is also supported. Energy ADE thus supports a wide range of applications in the energy analysis of buildings.

The process of adding energy-relevant information to CityGML files extended with the Energy ADE is called an enrichment process. The development, work, and concepts behind the tool and process are described in (Geiger et al., 2018), while the schema for the Energy ADE 2.0 is freely available online (Benner, 2017).

The CityGML LOD2 model of Building 445 is provided by the Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg and is corrected during the data treatment phase, both geometrically and semantically. It stands as the LOD2 model for the base case. Further work on the outside hull creates a detailed architectural model of the building by adding windows, doors, a portico, and an entryway, representing the LOD3 building model.

Energy modeling input

The investigation is based on parameter values presented in Table 5 and Table 6. Parameters pertaining to building usage and building physics are estimated as precisely as possible with the purpose of having a consistent digital twin. This makes the energy demand values produced by means of simulation generally ideal. In Table 1, the opening ratio refers to the window to the external wall ratio.

Concerning weather data, the data used is produced at an hourly resolution by using Meteornorm, a commercial software, described in detail in Remund et al. (2020). It represents typical values for the region of Karlsruhe, Germany.

Table 1: Building physics and descriptive parameters

Volume (m ³)	9608.92		
Surface on the ground (m ²)	783.59		
Number of floors	3		
Opening ratio	40%		
Infiltration rate (l/h)	0		
Building specific heat capacity (J/K)	1		
Windows glazing ratio	0.7		
Windows U-values (W/(m ² *K))	1.8		
	Roof	Façade	Ground
U-values (W/(m ² *K))	0.484	0.558	0.393
Thickness (m)	0.3	0.3	0.2

Table 6 Usage profiles office building

Heating profile	0 – 24 h	21 °C	Weekday
	0 – 24 h	21 °C	Weekend
Cooling profile	Cooling deactivated		
Ventilation profile	0 h – 8 h	0 l/h	Weekday
	7 h – 21 h	1 l/h	
	0 h – 24 h	0 l/h	Weekend
Shading profile	No shading devices		
Lighting Profile (luminance 200Lux efficiency 50W/m heat emission 4W/m ²)	0 h – 8 h	0%	Weekday
	7 h – 18 h	100%	
	18 h – 24 h	0%	Weekend
Occupant Profile (82 W per Person, 32.85 m ² / Person)	0 h – 7 h	0%	Weekday
	7 h – 8 h	20%	
	8 h – 9 h	40%	
	9 h – 10 h	60%	
	10 h – 12 h	80%	
	12 h – 13 h	40%	
	13 h – 14 h	60%	
	14 h – 16 h	80%	
	16 h – 17 h	40%	
	17 h – 18 h	20%	
18 h – 24 h	0%	Weekend	
0 h – 24 h	0%		
Equipment Profile (7 W/m ²)	0 h – 7 h	10%	Weekday
	7 h – 8 h	20%	
	8 h – 9 h	40%	
	9 h – 11 h	80%	
	11 h – 12 h	40%	
	12 h – 13 h	20%	
	13 h – 14 h	40%	
	14 h – 16 h	80%	
	16 h – 17 h	20%	
	17 h – 24 h	10%	
0 h – 24 h	0%	Weekend	

Use case definition

The use case is centered on the estimation of heating demand for a single office building within a reference year at an hourly resolution. The influence of the surrounding buildings through shading is ignored. For the estimation, a LOD2 or LOD3 spatial model stored in the CityGML 2.0 format is made available. The

spatial data goes through the enrichment process with energy-relevant parameters (building descriptive parameters, building physics parameters, and occupancy behavior) stored in the Energy ADE, thus providing a digital twin suitable for energy simulation. The enrichment process is described by Geiger et al. (2018). This output file is then loaded in the simulation environment of EnergyPlus.

Sensitivity tests

The method applied in the present paper is called local sensitivity analysis, or O(F)AT, for details see the Background chapter. This approach requires that only one input parameter is changed while the others are fixed. It has the strength of providing feedback on each tested parameter individually.

The parameters tested are classified as follows:

- Spatially and geometrically dependent:
 - LOD
 - Number of stories above ground
 - Existence of a cellar
 - Wall opening ratio
- Building physics dependent:
 - U-values
 - Infiltration rate
 - Specific heat coefficient
- Occupancy dependent:
 - Constant inner temperature
 - Business hours scheduling

The next subchapters present reasoning and scientific questions that justify the design and selection of tests.

Spatially and geometrically dependent parameters

The lack of detailed spatial information is listed as a potential drawback in UBEM applications (Reinhart and Cerezo Davila, 2016). The tests quantify the influence of a higher LOD and the presence of a cellar on demand modeling. Table 2 presents the building volume and height of samples.

Table 2: Sample buildings spatial parameters

SAMPLE GEOMETRY	WITH CELLAR	WITHOUT CELLAR
Volume (m ³)	11241.14	9608.92
Building height (m) (without elevator house / plant room)	14.1	12.02
Building height (m) (with elevator house / plant room)	16.7	14.62

In CityGML, the number of stories above ground of a building is often provided with the spatial model as a separate attribute. However, because of the many irregular shapes of rooftops, the automatic extraction process from photogrammetric products is prone to error. This is also the case for Building 445, which due to the extended stairwell is defined as having one extra floor. When the attribute is completely missing, it is

guesstimated by the energy modeler prior to the simulation run. This significant geometrical parameter is then used to assess the number of people and equipment present in the building using averages. As such, it has a significant impact on the internal gains of thermal energy for the building.

One of the most important sources of thermal energy in any building is the amount of direct solar radiation that can go through the windows. The amount directly correlates to the opening ratio in its general impact in the total demand.

Building physics parameters

From building physics, U-values play a significant role in establishing the thermal behavior of materials concerning heat gains and losses. U-values are calculated based on material thickness and thermal conductivity. Please note that the relative reduction and rise of these values are applied differently to windows compared to the façade, ground, and roof, as explained in the Results chapter. Specific heat capacity influences the amount of thermal energy that a building can store, from both external heat gains, and internal sources (equipment, occupants, and lighting).

Most buildings are not airtight and are purposefully designed as to allow for a natural exchange of the air inside the building (natural ventilation). In addition, unintentional outdoor airflow (infiltration) occurs. Testing different values for infiltration gives an idea of the significance of the impact that energy refurbishment aimed at these issues can play. These measures include, for example, the replacement or sealing of windows and doors that are not airtight, important factors related to energy demand. In the base case, the value of infiltration is set to zero.

Occupancy parameters

Inner temperature is most often fixed as a single value in UBEM and sometimes provided with a schedule in BEM. This is why there are two distinguished tests in this parameter section. The first one tests a variation in the inner set temperature and a second one assesses the usage of a scheduler for the inner set temperature. The scheduled temperature reduction was set for out of business hours, 0h-7h and 19h-24h during weekdays and 0h-24h during weekends.

RESULTS

Spatially and geometrically dependent parameters

LOD and cellar impact

The first test performed concerns the external hull of the building, namely the comparison between different LOD spatial models and the existence of a cellar. Figure 2 depicts the variation in between spatial models of different details present in the outer surfaces.

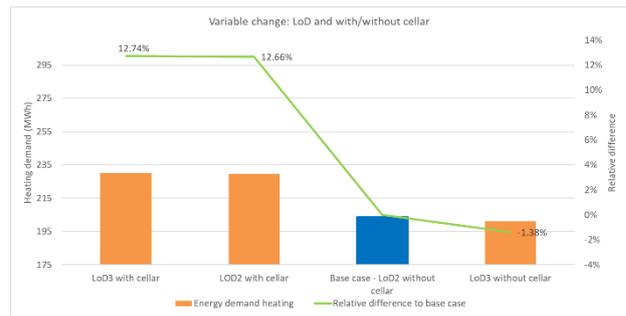


Figure 2: Influence of LOD and cellar presence

The LOD increase does not significantly change the result of the heating demand (1.38%), however, these results are highly dependent on the opening ratio variable. The addition of a cellar has a substantial influence (an increase of 12.66%, respectively 12.74% with LOD3).

Number of stories above ground

Figure 3 depicts the influence of this parameter upon energy demand in both simulation environments.

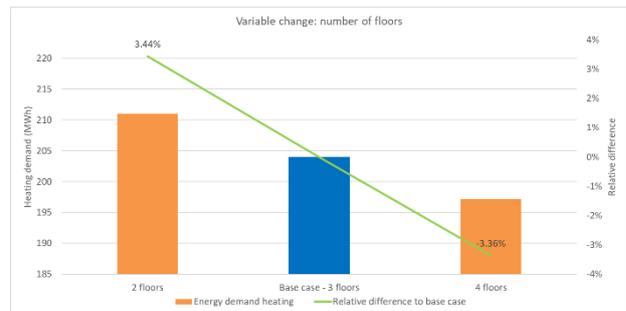


Figure 3: Influence of number of floors

The tests include a variation of +/- one floor with a corresponding change in either direction of approximately 3.5% relative to the base case.

Wall opening ratio

For this parameter, a large variation was selected, from 0 to 99% in incremental steps of 10 percentage points. Results from both simulation environments are presented in Figure 4.

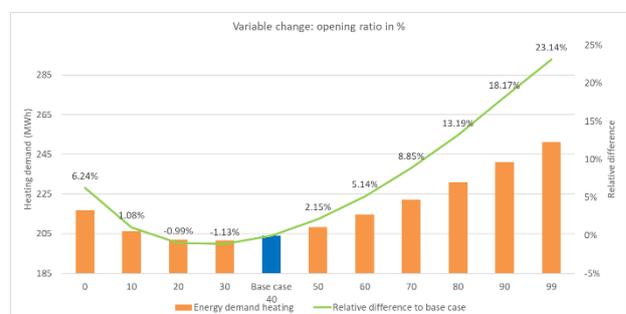


Figure 4: Influence of opening ratio

The results show a low to moderate impact of the changes. The reduction of the parameter presents reduced thermal demand of around 2% for every 10% opening surface. Opposite, the increase in surface presents a heightened demand of relative 3% value for every 10% of added surface.

Building physics dependent parameters

U-values / thermal conductivity variations

In the case of the ground, façade, and roof, U-values are dependent on two factors: thickness and thermal conductivity. In order to be able to apply the variation of U-values, the wall thickness is considered constant. At the same time, an exponential increase/decrease of 5%, 10%, 20%, 35%, and 50% is applied in thermal conductivity. For windows, the same coefficient reduction/increase is applied directly on the U-values. The results are presented in Figure 5.

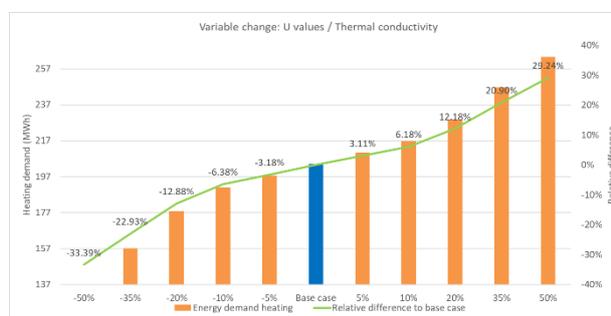


Figure 5: Influence of U-values / thermal conductivity variation

The behavior of thermal demand upon parameter change is synchronized in between negative and positive parameter changes. For every 5% increase / decrease there is a 3 to 3.5% decrease / increase in thermal energy demand.

Infiltration rate

The building’s air exchange ratio is set to 0 for the base case. In each test, an additional 0.2. ACH unit is added with the maximum tested value being 1.4 ACH. Figure 6 depicts the results in this test.

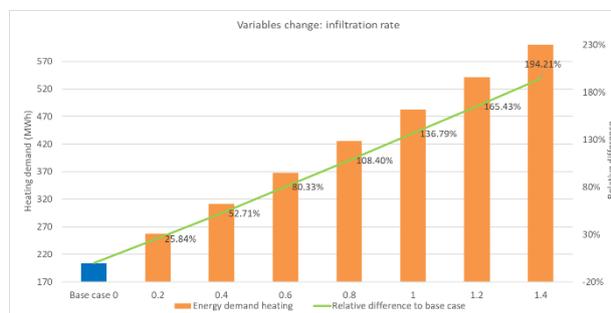


Figure 6: Influence of infiltration rate

The results show an increase of approximately 26% for each 20% added. This value corresponds to the greatest change in thermal energy demand out of the parameters that are tested.

Specific heat capacity coefficient

This parameter was tested with an exponential rise / reduction of +/- 5%, 10%, 15%, 20% and 25%, as is presented in Figure 7.

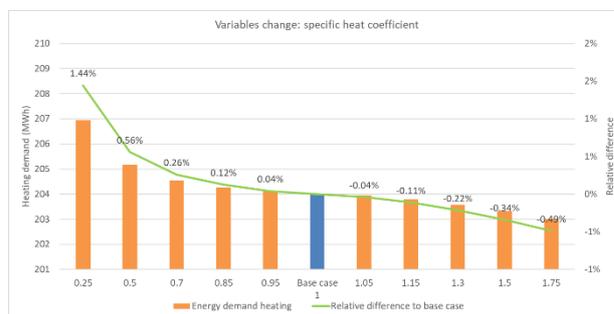


Figure 7: Influence of specific heat capacity

According to the results, there is a small difference with the relative rise/reduction in value of 1 to 100. Initially, for every 1%, there is a 0.04 difference. This increases slightly towards the extreme of the graph.

Occupancy parameters

Constant inner temperature

For the base case, the setpoint value for inner temperature in Building 445 is set at 21°C. Two variations of the base case are tested. In the first one, the general temperature is tested at intervals of 2°C in gradual steps from 15°C to 25°C, as illustrated in Figure 8.

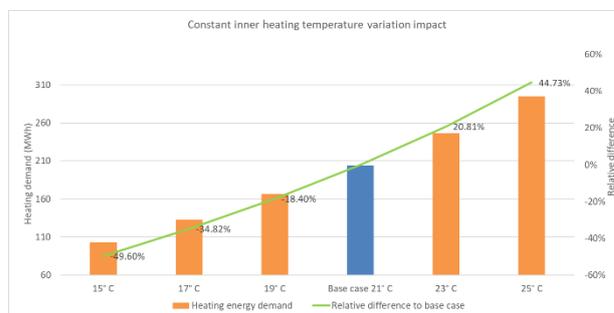


Figure 8: Impact of changing the constant inner temperature

Results show that for every 2°C rise/reduction, there is an approximate corresponding 21% rise / 18% reduction of the annual heating demand.

Business hours scheduling

In the second variation, the 21°C set temperature is kept for all business hours. For nights and weekends, the temperature is tested in steps of 1°C from 21°C to 16°C. This is portrayed in Figure 9.

Providing the simulation with an additional heating schedule results in a 4.4% reduction of total energy demand for every 1°C shrinkage outside of office hours.

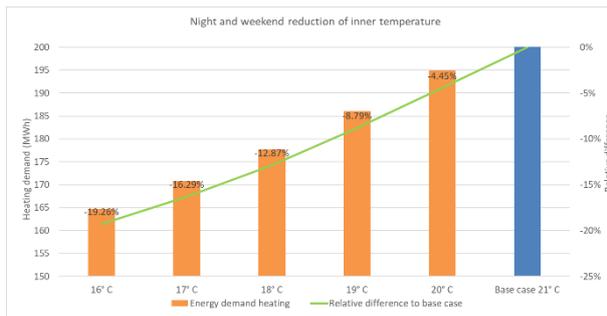


Figure 9: Impact of a heating schedule at varied temperature values

Summary

In order to assess the impact of errors in parameter estimation, all parameters’ results are collected in a single chart, Figure 10, not with the purpose of ranking, but of comparing parameter sensitivity. It can be observed that four parameters lead to sensitivity impacts of above 10% in the final heating demand upon a change of less than 10%. These are constant inner temperature, the existence of a business hours scheduler with temperature reductions, infiltration rate, and U-values / thermal conductivity.

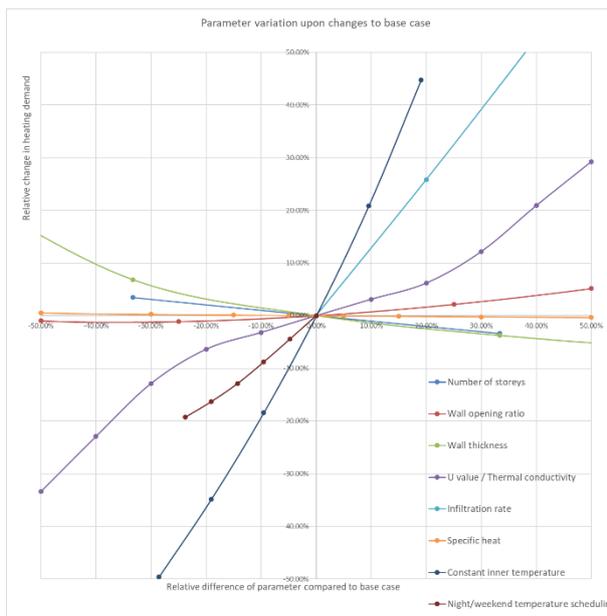


Figure 10: Parameter significance consequent to variation of base case

DISCUSSION

Spatially and geometrically dependent parameters

One of the tested parameters, the presence of a cellar, brought a significant difference to the base case. In energy modeling practice, this represents an often-overlooked spatial detail and can significantly alter thermal energy modeling results performed as described in the use case. However, our base case incorporates a heated semi-basement and the simulation treats the building as a single thermal zone.

That means that extrapolating this result to other cases requires further testing.

Comparing the enhanced spatial description of Building 445 in LOD2 and LOD3 does not present significant differences. LOD2 does not include any windows surfaces. The results support the idea that for the scope of thermal energy modeling at a large scale, LOD3 is not required. However, the opening ratio used in the LOD2 simulation is very precise when compared to the real Building 445 and presents an ideal scenario. This plays a considerable role in the small impact the enhanced spatial model plays in the result and in general, is not the case in UBE where statistical values are used for this parameter. The best way to interpret this test is that modeling the total size of the window area correctly is important and that the spatial distribution of windows is not significant (as long as there are no shadowing effects).

Concerning parameters related to the geometry of the façade: wall opening ratio has a minimal impact.

The number of floors only has a marginal impact on results. The number of floors is directly correlated to internal gains by means of the surface size.

Building physics dependent parameters

Pertaining to building physics dependent parameters, two of the parameters tested, U-values and infiltration rate, have significant impacts on final thermal demand. Of these parameters, U-values traditionally receive more attention due to their inclusion within building energy performance certificates, while the infiltration rate is often neglected. The third tested parameter of the category, specific heat capacity, has a negligible impact.

Occupancy dependent

Both approaches tested for modeling the habits of building residents, constant inner temperature, and heating scheduling, result in significant impacts. These observations provide a testimonial that data-gathering efforts should also use occupancy profiles or provide connections to socio-economic indicators that can refine energy use behavior.

CONCLUSION AND OUTLOOK

The present paper provides an understanding of the sensitivity that input energy-relevant parameters have in the outcome of thermal energy modeling simulations for an office building with research activities located in the region of Karlsruhe, Germany. The results should not be interpreted by focusing on one parameter alone but rather on the entire data collection and treatment effort.

For our base case, the most sensitive parameters in tests are infiltration rate, setpoint temperature, and scheduling of night/weekend setpoint temperature. Small variations of this input have a large impact on

final thermal energy demand. The tests concerning U values and the presence of a cellar show a moderate to significant impact. Our results are in line with four similar studies presented in the state of the art sub-chapter that identify the infiltration rate, user behavior, floor area, and thermal transmission as having large impacts on thermal demand of building stock in temperate continental climate.

Results are indicative of what could be a gap in the energy data collection processes. This pertains to the general lack of cellar information, the often neglected infiltration rate, and occupancy behavior (setpoint temperature and heating scheduling). Out of all the parameters with significant results, only U values are collected regularly in energy performance certificates.

Buildings from other sectorial activities and geographical locations need to be systematically analyzed to see if the current results and interpretation can be similarly observed.

ACKNOWLEDGEMENT

We thank our colleagues Karl-Heinz Häfele and Joachim Benner for their assistance with manuscript review and topical discussions.

Funding was provided by the Helmholtz Association and the German Ministry of Education and Research, Research project SEKO.

REFERENCES

- Agugiaro, G., Benner, J., Cipriano, P., Nouvel, R., 2018. The Energy Application Domain Extension for CityGML: enhancing interoperability for urban energy simulations. <https://doi.org/10.1186/s40965-018-0042-y>
- Benner, J., 2017. CityGML Wiki [WWW Document]. CityGML Wiki. URL http://www.citygmlwiki.org/index.php?title=Citygml_Wiki (accessed 3.22.20).
- Benner, J., Geiger, A., Häfele, K.-H., 2016. Virtual 3D City Model Support for Energy Demand Simulations on City Level – The CityGML Energy Extension, in: Beiträge Zur 21. Internationalen Konferenz Zu Stadtplanung, Regionalentwicklung Und Informationsgesellschaft. Hamburg, DEU.
- Biljecki, F., 2017. Level of detail in 3D city models (Doctoral dissertation). TUDelft, Delft, Netherlands.
- Crawley, D.B., Lawrie, L.K., Winkelmann, F.C., Buhl, W.F., Huang, Y.J., Pedersen, C.O., Strand, R.K., Liesen, R.J., Fisher, D.E., Witte, M.J., Glazer, J., 2001. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy Build.* 33, 319–331. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00114-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00114-6)
- de Wilde, P., Tian, W., 2009. Identification of key factors for uncertainty in the prediction of the thermal performance of an office building under climate change. *Build. Simul.* 2, 157–174. <https://doi.org/10.1007/s12273-009-9116-1>
- Delgarm, N., Sajadi, B., Azarbad, K., Delgarm, S., 2018. Sensitivity analysis of building energy performance: A simulation-based approach using OFAT and variance-based sensitivity analysis methods. *J. Build.* 15, 181–193. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.11.020>
- Dulac, J., Abergel, T., Delmastro, C., 2019. Tracking Buildings. IEA, Paris.
- Geiger, A., Benner, J., Häfele, K.-H., Hagenmeyer, V., 2019. Building Energy Simulations at Urban Scale Based on Standardized Data Models Using a Transparent Enrichment Process, in: Final Proceedings of the IBPSA 2019 Conference Rome. Italy, p. 7.
- Geiger, A., Benner, J., Häfele, K.-H., Hagenmeyer, V., 2018. Thermal Energy Simulation of Buildings based on the CityGML Energy Application Domain Extension, in: Proceedings of the BauSIM 2018 Conference, Karlsruhe, p. 8.
- Gröger, G., Kolbe, T.H., Nagel, C., Häfele, K.-H., 2012. OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard.
- Kalogeras, G., Rastegarpour, S., Koulamas, C., Kalogeras, A.P., Casillas, J., Ferrarini, L., 2020. Predictive capability testing and sensitivity analysis of a model for building energy efficiency. *Build. Simul.* 13, 33–50. <https://doi.org/10.1007/s12273-019-0559-8>
- Kristensen, M.H., Petersen, S., 2016. Choosing the appropriate sensitivity analysis method for building energy model-based investigations. *Energy Build.* 130, 166–176. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.038>
- Pezeshki, Z., Soleimani, A., Darabi, A., 2019. Application of BEM and using BIM database for BEM: A review. *J. Build.* 23, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.01.021>
- Reinhart, C.F., Cerezo Davila, C., 2016. Urban building energy modeling – A review of a nascent field. *Build. Environ.* 97, 196–202. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.001>
- Remund, J., Müller, S., Schmutz, M., Barsotti, D., Studer, C., Cattin, R., 2020. Meteororm. Meteororm.
- Tian, W., 2013. A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 20, 411–419. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.014>

THE BENEFITS OF ENERGY REFURBISHMENT STRATEGIES ON AN ADAPTIVE REUSED INDUSTRIAL HERITAGE BUILDING

E. E. Yalçın¹, N. Türkmenoğlu Bayraktar¹ and E. Kishali¹

¹Kocaeli University, Faculty of Design Architecture, Department of Architecture, İzmit, Kocaeli, Turkey

ABSTRACT

It is possible to compensate the existing city requirements without constructing new buildings and provide a socio-economic contribution to the region by the adaptive reuse of existing structures. The adaptive reuse of non-functional structures that have historic value will not only create a cultural bridge between past and present but also prevent the energy consumption that increases due to the construction processes of new structures. The strategies implemented for these buildings have to provide functional requirements, energy efficiency, optimum climatic, visual, acoustical comfort conditions and minimum environmental effects.

In this study, the effects of energy retrofit strategies on annual energy consumption are investigated through Derince Travers Injection Plant which is an example of an industrial heritage located in Kocaeli-Turkey assumed to be adapted to a social center complex.

The physical conditions of the building are examined by site analysis conducted with infrared thermography (IRT), non destructive test method to determine suitable energy retrofit strategies. Annual energy consumption amounts by implementation of determined strategies on the adaptively reused building are analyzed and compared by the energy analysis program, Design-Builder. The comparison of the result of the total amount of annual energy consumption of the building due to suggested strategies with the limit values defined in national Turkish energy standard showed that its energy class is C which is defined as appropriate range.

INTRODUCTION

Technical developments, diversification of dimensions, process and relations of production equipment stimulated by the increase in production demand have created new spatial requirements in industrial structures. It is observed that some of them can be utilized with their original functions with appropriate interventions; some have not been able to respond to these requirements, have been re-used with new functions or have been abandoned in idle state. Another reason for the industrial structures to remain dysfunctional is the change in raw material supply areas and inefficiency caused by product competition. Generally, the existing industrial structures have failed

to meet the requirements of the era. For this reason, the new structures were started to be built to respond to the increase in production, and industrial heritage structures that were abandoned by being deprived of maintenance faced the threat of demolition. While some of these abandoned structures have been demolished, qualified conservation and adaptive reuse methods for remaining have started to be discussed at the national and international levels.

It is debated to bring the existing structure into use with original or new function after investigations on structural conditions in the context of the adaptive reuse approach as a conservation method. The method of refunctioning is mentioned by “adaptive reuse” concept in ICOMOS (International Council on Monuments and Sites), Turkey Architectural Heritage Conservation Declaration. In this declaration, it is indicated that the new function should respect the originality, integrity and identity of the structure.

Construction is one of the sectors that consume energy the most and pollute the environment dramatically. Therefore, the utilization of existing buildings without constructing a new structure makes a precious contribution to reducing energy consumption and environmental pollution. While the adaptive reused structures in Europe are being designed, active-passive systems are also integrated in the design period in order to increase energy efficiency and reduce CO₂ emissions. When these studies are reviewed, it is observed that the issue of energy efficiency in the reuse of industrial heritage structures has been handled effectively. For example, Becchio et al. (2015) conducted research on methods to reduce energy consumption and cost in adaptive reused historical buildings. He examined an industrial structure in Turin in this context. Giombini et al. (2015) addressed the city of Perugia in Italy and examined the contribution of energy retrofit interventions on existing buildings to increase energy efficiency. Ceroni et al. (2015) performed structural and energy analyzes of the Palazzo Bosco Lucarelli building in Benevento and mentioned practices to increase energy efficiency in line with these analyzes. Lopez et al. (2013) discussed the application methods of active energy systems in adaptive reused historical

structures, not contrary to the concept of conservation. Therefore, the decisions to increase energy efficiency in the reuse process can be considered as interventions that can be applied in the building envelope, the use of renewable energy sources, and the selection of suitable mechanical and electrical systems. All these approaches provide opportunity for decreasing energy consumption amounts and unwanted environmental effects during operation stages of the adaptive reused building differently.

Interventions on old building materials or systems cause energy consumption and environmental effects during, material extraction, refinement, processing, manufacture of materials, transportation to the site. Moreover, the replaced items turn back to the recyclers, installation of replacement elements are some of the stages that account for material production for retrofit and maintenance phases that cause energy consumption in the context of recurring embodied energy and carbon (Azari and Abbasabadi 2018).

Generally, the operation stage which comprises energy consumption and environmental effects of heating, cooling, water heating, lighting, and appliances are considered in the studies but all the stages during the lifespan of the building must be considered totally through the determination of realistic energy consumption and environmental effects.

Minimum natural resource extraction, the minimum energy consumption of energy and materials must be the pioneering approach during retrofit and refurbishment processes for adaptively reused heritage buildings in the context of life cycle view of point (Foster 2020). In the retrofit stages, the materials with the lowest life cycle effects must be chosen.

In this study, the importance of material and active-passive system decisions to reduce energy consumption in adaptive reused industrial heritage structures and their contribution to annual energy consumption is investigated through Derince Travers Injection Plant, an industrial heritage located in Kocaeli-Turkey. The result of the total amount of annual energy consumption of the building due to suggested strategies is compared with the limit values defined in the national Turkish energy standard. As the limit values defined in the standard do not consider the embodied energy inputs, the boundary of the study was organized only by consideration of operation phase energy outputs without embodied energy input occurring during the life cycle of the building.

The building is assumed to be adapted to a social center complex. It is also aimed to figure out the

contribution of integrations on building envelope; utilization of renewable energy sources and newly proposed mechanical, electrical systems due to new function to increase energy efficiency in the adaptive reuse of the building. The strategies derived for the building envelope are determined due to site analysis conducted by infrared thermography (IRT), diagnosing the existing deteriorations, energy losses, and gains. Annual energy consumption amounts are calculated and analysed by the energy analysis program, Designbuilder in order to observe the effects of the implementation of determined strategies on the adaptively reused building.

Total amount of annual energy consumption of the building after implementation of suggested strategies are compared with the range values of energy class index defined in national Turkish energy standard.

THE ENERGY RETROFIT STRATEGIES

The energy refurbishment process is composed of building performance assessment, measurement of energy savings, economic analysis, risk assessments (Ma et al., 2012). Diagnosis of the physical conditions of the building components, current energy use, climatic, visual, acoustical comfort levels, indoor environmental quality is the first step to determine the appropriate retrofit solutions for the historic buildings (Flourentzou et al., 2002).

The diagnosis of the building elements which is one of the most important steps of building performance assessment provides an opportunity to get information on the existing physical conditions of building elements. The deteriorations, the lack of insulation layers, thermal bridges cause not only mould, efflorescence and/or subflorescence forming, etc. problems but also unwanted heat gain and losses (Franzoni, 2014). The investigation of the problems on building envelope helps to derive the right retrofit scenarios for these building elements to increase building energy performance and comfort conditions.

The data derived from the diagnosis step provide realistic information to energy assessment of the historical building and deciding the best energy approach as it shows the current status of the structure. Annual energy performance of the case study in terms of heating and cooling without energy retrofit applications must be simulated to make the comparison (Pisello et al.2014). Energy retrofit scenarios can be implemented in terms of 3 main approaches.

- Improvement of the building envelope.
- Integration of renewable energy systems
- Increasing the efficiency of heating and cooling equipment (Cabeza et al., 2018).

Intervention strategies on the adaptive reused building envelope

Exterior walls, windows, doors and roofs are the building elements through which most of the heat losses and gains occur. Technical details and material selections should be made by consideration of the optic and thermophysical characteristics of the materials and the sequence of the layers to prevent humidity problems and reduce the heating load in winter and cooling load in summer. In the reused historical structures, outer insulation is not preferred on the facade to preserve the historical texture.

Therefore internal insulation can be applied in buildings where the transmission coefficient of the wall material is low. However, there are disadvantages such as the formation of thermal bridges, the reduction of the interior area, additional manufacturing and cost increase. On the other hand, since the roofs are in direct contact with the external weather conditions, especially in abandoned historic structures, insulation problems may occur when maintenance and repair are not performed. This causes rotting on roofs with wooden beams, corrosion on roofs with steel girders, effloresces and molds on the walls. Strengthening studies are needed in structures where the existing construction is in bad condition. In addition, since the roofs of some neglected industrial heritage buildings are covered with materials that are considered hazardous to health today, these materials may mix with nature and damage human health. In such cases, the roof material covered with a substance harmful to health is replaced with a material suitable for the original appearance of the structure. Preserving the original material in reuse is also of great importance in the usage process.

Suitable insulation material should be selected by considering the fire, heat and water factors in both the original structure and the additional structure roofs required by the new function, in the reused structures. Openings in industrial heritage buildings are of great importance in reflecting the historical value of the building. It is preferred that the original dimensions of the windows do not change and if possible, the original material is used when these structures are re-functioned. But usually wood joints rot by taking water over time. The joinery, which cannot be used, is replaced and multi glazing is preferred in order to provide heat insulation during the reuse process of the glasses (Köksal, 2005). Using double glass instead of a single glass to increase energy performance may cause visual differences in the elevations. In cases where the existing window casing can be used, the second layer of glass can be added to the structure with a new casing and wing to prevent this difference and not increase the load on the window casing (Abusamhadana et al., 2018).

The low thermal transmittance, U-value of the filling material to be used between the glasses also reduces the thermal transmission of the glasses. Energy performance can be increased by using gases like argon, krypton, etc. instead of the dry air gap between glasses. Designs with low-E coating of glass and U value below $1.8 \text{ W} / \text{m}^2\text{K}$ are recommended to be selected in TS 825.

Integration of renewable energy systems to adaptive reused building

The integration of renewable energy sources with active-passive energy systems will contribute to increase energy efficiency and decrease carbon dioxide emission also in the adaptive reused buildings. However, the utilization of these systems in historical buildings requires a meticulous study. Transformation or updating these systems as required by the new function, have to be made carefully not to ruin the historical value and architectural fiction of the building. Increasing natural ventilating and lighting performances have to be given importance. When the refunctioning examples are analyzed across buildings of historical value, it is observed that the most common approach is saving energy in terms of electricity and mechanics by using solar panels. Integration of PV modules, tiles texture on building roof systems compatible with the building in terms of color and which also decrease carbon emissions; providing heating and cooling demands by renewable energy sources as biomass wood pellets, geothermal heating, solar thermal heating, and absorption cooling are the other attempts that provide energy efficiency (Cabeza, 2018).

Increasing the efficiency of heating and cooling equipment of adaptive reused building

In cases where natural ventilation and lighting are insufficient, the selection of mechanical and electrical systems should be made in a way that does not contradict the architectural value of the building and minimize energy consumption.

The choice of mechanical systems in historical re-used buildings may differ depending on the new function and the type of intervention to be performed. In these buildings, the interventions that require major renovation are avoided with the concern of preserving the historical value. Air-conditioning systems are preferred, which provide design flexibility with higher energy efficiency compared to conventional systems, with narrow and easy application in different areas. The control of indoor climate conditions is another reason for the use of air conditioners in the adaptive re-used buildings not to damage the equipment of the original function. Heating and cooling operations can be provided with duct type split air conditioners with external air connection. Often the high wall thickness is a factor that makes the passage of the channels

difficult. VRF systems are suitable options due to the insufficient space to position the outdoor unit for each zone. Automation systems have special importance in buildings with historical value. When these systems are used without damaging the historical texture of the building, they benefit in terms of air conditioning, security and fire safety. The utilization of Building Energy Management Systems (BEMS) dramatically reduces energy consumption by controlling the amount of heating/cooling and ventilation according to the activity and intensity of use in each location. With the integration of the automation system, efficient operation of the chiller system with suitable capacity, mixed air handling unit, fancoils, condensing boilers can be provided. Unnecessary energy consumption can be prevented to a great extent in heating, cooling, ventilation and lighting system by human sensitive sensors. Energy efficiency can be increased by choosing lighting elements with high lumen/watt ratio.

Case study: Derince Travers Injection Plant

Derince Travers Injection Factory functioned as wooden traverse creosote injection factory until 2001 in a single block is located in Kocaeli province, Derince Port Area district. The construction of the factory was started in 1930 by a German company called Borsig. The factory started its operations in 1931 and was operated by German masters until its final acceptance (Berkel, 1954). Although the structure is subjected to deformations, it is still standing with its external and internal equipment (Figure 1) (Qi, 2016). There is a wagon maintenance workshop in the south of the building, a registered transformer structure in the east, Demirspor facilities with a single-story in the north, and open storage areas in the west (Bozdağ, 2013). Derince Travers Injectable Factory has been registered as an industrial heritage with the decision of Kocaeli Cultural Heritage Preservation Board of the Ministry of Culture and Tourism on 14.05.2013, due to its technical and historical features, as reflecting the industrial movements of the 20th century in the region, modernist facade layout, steel-wooden truss roof system, original site equipment and details, architecture. Although there are re-use planning and attempts, the structure is still obsolete.



Figure 1: The non-functional Derince Travers Injection Factory

Proposal: New function

International research was prepared under the project, named as BOOSTHER submitted to H2020 calls. In the project, the main local partner was TCDD (Turkish State Railways), Derince Municipality and Kocaeli University, and the Kocaeli Metropolitan Municipality was the supporting partner. The building was proposed to be reused adaptively as a social center after physical and social analyzes for the region, structural evaluation of the structure by considering the needs of their community and aim to provide an economic contribution to the district (Kavuru, 2017). According to the project, there were restaurant, dance, workshop and bar spaces in the building, assumed to serve as a social center for Safiport employees and Derince people. In the place where the mezzanine is located, the chemical tanks left from the original function have been fully preserved, and this place has been used as an surveillance area. In addition, kitchen, open area in front of the restaurant and main entrance sections were added to the building for the new function.

Diagnosis process

Diagnosis of the physical condition of Derince Travers Injection Factory was conducted by on-site observation and imaging studies with thermal cameras. Heat leakages from the cracks and thermal bridges at the junction points of the building elements have been identified on the building envelope (Figure 2). On the facade, there are efflorescences, cracks and salts caused by moisture. Although there is no serious structural damage, there are some deteriorations as plaster cracks, material loss and color changes in the plaster. All window glazings are broken on the facade of the building, and there are spatial cracks and spills (Figure 3). Wooden forehead boards of the structure without rain gutter are rotten in a structure which also increases the mould problems. Asbestos is used as the roofing material. The odor of creosote (tar oil), which was used to tighten wooden sleepers and to protect it from external conditions, still exists in the building. There is no mechanical-electrical system available in the building currently.

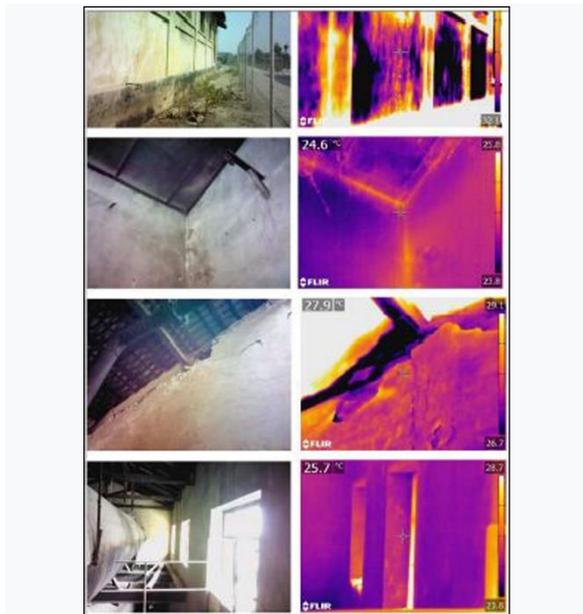


Figure 2: Derince Travers Injection Factory thermal camera images



Figure 3: Derince Travers Injection Factory deformation on the facade

Energy retrofit strategies proposed for Derince Travers Injection Plant

Intervention suggestions for energy retrofit of the building were made in the context of assumptions for the new function of the structure. Strategies have been developed for the building are; Strategies for the building envelope, integration of renewable energy sources, the suggestion of HVAC and lighting systems.

Interventions for building envelope

In order to avoid thermal bridges and to benefit from the heat storage feature of the building elements, external thermal insulation was proposed for the outer walls of the kitchen, which were added to the original structure in line with the new function.

Insulation was proposed to the roof of the same zone. Since PV panel systems are suggested for this area, protection concrete on insulation is recommended in order not to damage the waterproofing during maintenance processes. As the roofing material of the original structure is asbestos, which is a substance harmful to health and the environment, self-mineral mineral insulated metal panel was suggested due to its

maintenance, repair, easy and fast assembly advantages. The corrugated metal panel is considered as the panel type in order to be compatible with the original appearance of the building.

In the study of Kavuru (2017), a new glazing type with a low thermal transmission coefficient for broken and unusable glasses across the structure is recommended. This suggestion was developed to increase the temperature control, daylight transmission and thermal comfort and “Low-e double glass with argon infilled, low iron additives” was used in all windows due to TS 825 values. It is aimed that maximum amount of the daylight would enter the interior space with the selection of low iron added glass.

Integration of renewable energy sources

PV panels on the roof have been proposed in order to contribute to electricity consumption in heating and cooling. Considering the structural behavior of the existing building, it is assumed that 80 PV panels of a polycrystalline cell type with a size of 0.6 m x 1.00 m and 15% energy efficiency have been located on the roof of the kitchen zone.

Effective criteria in the selection of cell types were adequate application area, energy efficiency and cost factors. Shade length between panels, walking areas left for maintenance and cleaning requirements became the determining factors in deciding the number of PV panels. Terrace roof offers the opportunity to easily adjust the periodic angles of the panels. Thus, it is aimed to provide optimum benefit from daylight during the year.

The suggestion of HVAC and lighting systems

The building does not have any available mechanical-electrical systems so the equipment belonging to these systems has been converted into an exhibition element. In order not to damage the historical texture of the building, a split HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning) system has been proposed as a split air conditioner and independent ventilation system.

The wall thickness of the historical building, the number of zones in the building and the noise limitation of the area have greatly influenced the selection of the mechanical system. For this reason, air conditioning systems that require a minimum level of intervention were preferred for the reuse of Derince Travers Injection Factory as a social center. The split air conditioner has been proposed as a simpler solution instead of VRF system due to its low space requirement. In addition, the intensity and usage time of each department are different, it is aimed to save energy with automation systems. Artificial lighting appliances with high energy efficiency have been selected to support natural lighting. The illumination level appropriate for the function of each zone has been determined.

Annual energy consumption of Derince Travers Injection Plant with new function

Ensuring energy efficiency in the adaptive reused buildings is one of the issues to be considered. The energy consumption amounts should be calculated by the simulation period and the operating period and decisions should be taken to increase energy efficiency during selection of retrofit strategies. In this context, annual energy consumption amounts were calculated with the energy analysis program Designbuilder in order to evaluate the contribution of heating, cooling, ventilation systems, materials, lighting, PV panels propose in order to re-adapt the structure as a social center. The parts where different activities are performed are modeled as separate thermal zones (Figure 4, Figure 5). Climate data named “TUR_Kocaeli_MN6” was used for the calculations.

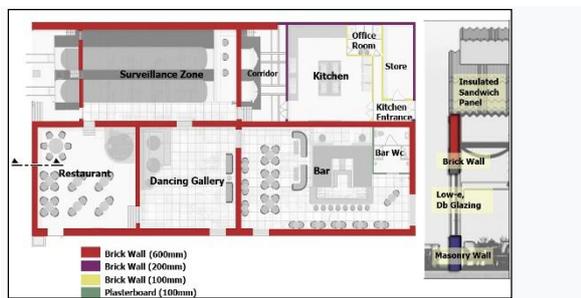


Figure 4: Schematic representation of Design Builder material inputs, (Kavuru, 2017), (Eres, 2019)

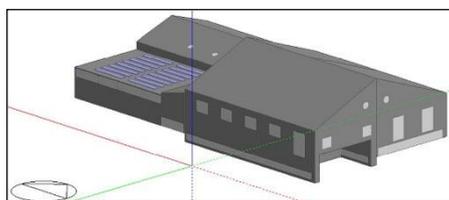


Figure 5: Design Builder model

The construction system of the wall is either stone masonry or concrete plastered in both faces (65 cm). The material of the slab is cast concrete covered by ceramic tiles (28 cm) Building occupancy hours are between 17:00 - 23:00 for restaurant and dance gallery; 08:00 - 00:00 for the bar, kitchen and surveillance room. Lighting intensities were selected from lighting data defined by DesignBuilder for specific activities in the zones.

The types of internal gains by occupancy and lighting are also defined. The daily operating time of every specific zone in terms of occupancy and lighting is determined due to activities performed. Infiltration, natural ventilation, and lighting information are also specified for every specific zone. A simple HVAC data template was used to calculate cooling and heating requirements. The simulation was carried out by HVAC models generated for split HVAC systems.

The results of the energy analysis of the strategies suggested to increase the energy efficiency of building assumed to be reused are presented. Annual energy consumption spent in the building with a total area of 846 m² has been calculated as 413.227,11 kWh (Table 1).

The PV panels used provided a 13.25% gain and reduced the total annual energy consumption to 401,764.03 kWh (Table 2). The total amount of energy per square meter is 494.95 kWh. The distribution of this amount is 103.73 kWh / m² for electricity consumption, 58.51 kWh/m² for cooling load and 332.71 kWh/m² for heating load (Table 3). It is seen that electricity consumption is the most in the building after heating. It is observed that the mean temperature variation is above 20 °C in summer and 0-10 °C in the winter period in Kocaeli. The set point temperature is 20 °C for winter and 25 °C for winter conditions. In the facility where cooling energy is required in summer and heating energy requirement in winter, the monthly average of operative temperature is mostly around 19.7- 22.06 °C in dining and bar areas. This amount corresponds to the restaurant ambient temperature in TS 825 standard. (TS825, 2008). The temperature and humidity level are consistent and maintained considerably within the comfort level. The discomfort hours are zero in summer and almost negligible in winter.

Table 1: Annual energy consumption amount

	TOTAL ENERGY	ENERGY PER TOTAL BUILDING AREA	ENERGY PER CONDITIONED BUILDING AREA
	[kWh]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]
Total Annual Energy Consumption	413227,11	494,95	494,95
Net Annual Energy Consumption	401764,03	481,22	481,22

Table 2: Electricity generation

	ELECTRICITY	PERCENT ELECTRICITY
	[kWh]	[%]
Photovoltaic Power (Total On-Site Electric Sources)	11463.08	13.24
Electricity Coming from Utility	75139.18	86.76
Surplus Electricity Going to Utility	0.71	0.00
Total On-Site and Utility Electric Sources	86601.54	100.00

Table 3:
Energy consumption per unit area for heating, cooling and lighting

	ELECTRICITY INTENSITY	DISTRICT COOLING INTENSITY	DISTRICT HEATING INTENSITY
	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]
Lighting	41,72	0	0
HVAC	0	58,51	332,71
Other	62,01	0	0
Total	103,73	58,51	332,71

Especially the amount of solar radiation acting from the southern façade with greater window wall ratio compared to the other façades, is higher in summer. It was observed that the utilization of mechanical ventilation increased in the summer months. Mechanical and natural ventilation systems operate during the active period of the business. For summer days, the calculation was made according to the time when the cooling load was maximum in each thermal zone. Total consumption amount, indoor temperatures, sensible and non-sensible heat loss gains and cooling loads were calculated. The kitchen and surveillance zone seem to create the highest monthly cooling and heating loads (Figure 6). Although it orients to the south, it was observed that the cooling load was mostly in the surveillance room due to the large size of the space, the glass/wall ratio, and the number of doors. The amount of energy spent for heating and cooling is very low compared to the surveillance room, due to the low opening and floor height in the kitchen space added to the original structure in the southern facade in line with the new function (Figure 7, Table 4).

Considering the heating load distribution of the building, the highest heating load is observed in the surveillance room again due to the space volume. Under the comfort conditions suitable for the activity to be performed in each thermal zone, the heat loss occurs mostly in the circulation areas and in the places where the floor height is high. It was observed that the heating load calculated for the restaurant section was higher than the dance gallery with the size of the nearby space due to the type of activity performed.

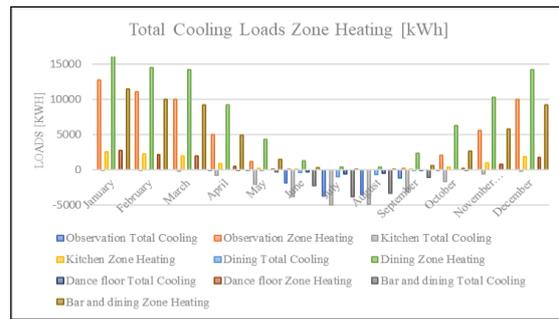


Figure 6: Comparison of zonal monthly cooling and heating loads

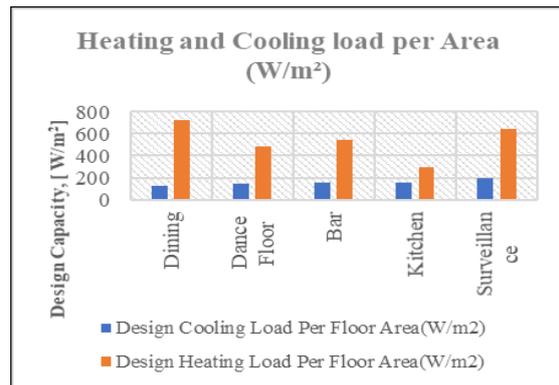


Figure 7: Cooling-heating design capacity distribution (W/m²)

Within the scope of the Energy Performance Regulation in Buildings, Primary energy reference indicator, (RG) value as 540 kWh/m²-year defined for “commercial building (restaurant, hotel and motel etc.) can be used for comparison as the functions are similar to a social center with calculated energy performance indicator in terms of primary energy (EP), the value of 481.22 kWh / m². When put in place in the table, the energy performance class is determined as C (Table 5). Although there is no specifically defined limit value on the energy class of existing structures in the regulation, Class C energy performance is a threshold but enough result for an existing structure to be adaptive reused.

Table 4:
Cooling-heating design capacity distribution (W)

Block	Design Capacity (W) (cooling)	Design Capacity (W) (heating)
Block 1-Dining	16.530,00	92.160,00
Block 2-Dance Floor Gallery	17.400,00	57.860,00
Block 3-Bar	32.600,00	115.780,00
Block 4-Kitchen	23.640,00	46.650,00
Block 5-Surveillance	43.450,00	140.570,00
Total	133.620,00	453.020,00

Table 5:
Energy performance class calculation table:

Building Energy Class	Energy Class Index by Primary Energy Consumption (EP)	Calculation
A	$EP < 0.4 * RG$	$481.22 < 216$
B	$0.4 * RG \leq EP < 0.8 * RG$	$216 \leq 481.22 < 432$
C	$0.8 * RG \leq EP < RG$	$432 \leq 481.22 < 540$
D	$RG \leq EP < 1.2 * RG$	$540 \leq 481.22 < 648$
E	$1.2 * RG \leq EP < 1.4 * RG$	$648 \leq 481.22 < 756$
F	$1.4 * RG \leq EP < 1.75 * RG$	$756 \leq 481.22 < 945$
G	$1.75 * RG \leq EP$	$945 \leq 481.22$

EP:	Energy Performance Indicator in Primary Energy (kWh/m ² -year)	481.22 kWh/m ² -year
RG:	Primary Energy Reference Indicator (kWh/m ² -yıl)	540 kWh/m ² -year Commercial Buildings (Hotel, Motel, Restaurant etc.)

CONCLUSION

This paper showed a method for an industrial heritage building how the application of specific action for the energy retrofit of existing buildings could decrease the annual energy requirement for heating and cooling in the pre-design phase of adaptive reuse actions.

The historic and listed factory carries multi-dimensional values as an industrial heritage asset in Kocaeli. The building was an issue of an international project and all the actors (the owner, municipalities and the experts) were convinced to involve a sustainable project for the neighborhood and the people working in the port close to the area. The building was proposed as a social hub and reuse strategies were sought. In this study, energy retrofit actions are applied to the building in the adaptive reuse design stage. The strategies which do not change the historic value of the façade were selected and the ultimate monthly and annual energy consumption values were obtained.

Structural analysis of the re-functional industrial heritage structures should be done first to determine physical conditions, it is necessary to determine the deteriorations and heat bridges that cause energy losses by means of undamaged tests such as IRT imaging methods and to perform energy analyzes with different scenarios in order to reduce these losses. Decision steps to improve energy efficiency regarding reuse of buildings; The choice of function suitable for the architectural setup of the historic building can be listed as material, mechanical- electrical equipment decisions and integration of active-passive energy systems without effecting the original appearance and the value of the building.

As a strategy of a passive approach, the integration of PV panels proposed for the reuse of Derince Travers Injection Factory contributed 13.24% to annual energy consumption. It has been shown that these systems can be applied in areas added to the building in line with the new function and without disturbing the architectural integrity.

Intervention suggestions to increase the energy efficiency of Derince Travers Injection Factory have been made and the net annual energy consumption per conditioned building area is calculated as 481.22 kWh/m². Although there are no specifically defined energy consumption limit values defined for historic buildings in Turkish energy regulation, in the study limit values for energy identity documentation of buildings which is obligatory for new and existing buildings after 2017 are used for the comparison of calculated values. According to the results, energy performance of the Derince traverse injection factory seem to provide threshold values of energy consumption with energy retrofit strategies. The energy class of the heritage building can be increased with other strategies to A or B class. Although this standard provide opportunity for calculation of carbon emission and energy consumption amounts, life cycle approach which include embodied energy and carbon defined as cumulative energy and carbon inputs occurring during construction, renovation-maintenance and demolition period in the life span of a building is not considered.

The building displays a unique value in terms of the urban context as it is located in the private port area where the manufacturing and process activities are high. The building was endangered to be demolished despite being listed as cultural heritage. Retrofitting and refurbishment activities conducted for the industrial structure to be adaptively reused with consideration of embodied energy and carbon through life cycle approach would be an operative tool for sustainable development by establishing a minimum increase in energy, carbon emissions and a maximum advancement of habitability. Particularly, the retrofit approaches proposed for the building would help to reduce the energy consumed during the operation phase. Acquisition of local raw materials causing a small amount of resource consumption and environmental effects, local manufacturing, processing, domestic workmanship along with the living knowledge on construction skills and the durability of the construction materials, decreasing the requirement of new materials and system are highly suggested in order to obtain the benefits not only through operation phase but also through all stages of life cycle of the building.

Energy consumption is an important issue in the use process for these structures that have been re-functioned by preventing the loss of energy resulting from the construction of a new building. An arrangement should also be made for existing buildings in the Energy Performance Regulation in Buildings, where only a limit value is given for new buildings. In the structures to be re-functioned, simulation studies should be carried out with different scenarios based on the limit value specified in the regulation, and according to the results of these studies, decisions should be made to improve the energy performance in the reuse of the structure.

REFERENCES

- Abusamhadana M.S.G, Bayraktar N.T. 2018. Energy Improvement Strategies in the Context of Thermal Comfort Requirements in Historical School Buildings: Ulugazi Primary School, Architecture and Life, Kocaeli TURKEY.
- Azari, R., N. 2018. Embodied Energy Of Buildings. *Energy and Buildings*, Volume 168: 225-235. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.003>
- Becchio C., Ferrando D.G., Fregonara E., Milani N., Serra V. 2015. The Cost Optimal Methodology for Evaluating the Energy Retrofil of An Ex-Industrial Building in Turin, 6th International Building Physics Conference, Torino ITALY.
- Berkel A. 1954. *Journal of Istanbul University Faculty of Forestry*, 4th issue, Istanbul University Faculty of Forestry, Istanbul TURKEY.
- Standard on energy Performance of the Buildings 2008. Ministry of Public Works.TURKEY
- Bozdağ B. 2013. Injection Plant Structure Survey Report on Kocaeli Island, Kocaeli Cultural Heritage Conservation Regional Board, Kocaeli TURKEY.
- Cabeza L. F., Gracia A., Pisello A.L. 2018. Integration Of Renewable Technologies in Historical and Heritage Buildings: A Review, *Energy and Buildings*, 177:96-111.
- Ceroni F., Ascionae F., Masi R.F.D, Rossi F.D, Pecce M.R. 2015. Multidisciplinary Approach to Structural/Energy Diagnosis of Historical Buildings: A Case Study, The 7th International Conference on Applied Energy, UAE Abu Dhabi.
- Eres E. 2019. Conversion Of Active-Passive Energy Systems In Adaptive Reuse Of Industrial Structures: Derince Traverse Injection Factory, Master Thesis, Kocaeli University, Graduate School of Science Engineering and Technology Kocaeli TURKEY.
- Flourentzou F., Roulet C.A. 2002. Elaboration of Retrofit Scenarios, *Energy and Buildings*, 34:185-192
- Foster, G. (2020). Circular economy strategies for adaptive reuse of cultural heritage buildings to reduce environmental impacts. *Resources, Conservation and Recycling*, 152, 104507.
- Franzoni E. 2014. Rising damp removal from historical masonries: A still open challenge. *Construction and Building Materials*, 54: 123–136. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.12.054
- ICOMOS Turkey, Convention for the Conservation Architectural Heritage http://www.icomos.org.tr/Dosyalar/ICOMOSTR_0623153001387886624.pdf (Date: 13.04.2020)
- Kavuru M. 2017. Conservation & Rehabilitation Proposal for Chemical Injection Factory, Master Thesis, Politecnico Di Milano, VI Faculty of Engineering Polo Regionale Di Lecco, Milano ITALY.
- Köksal T.G. 2005. Protection and Reuse Recommendations for Industrial Heritage in Istanbul, Ph.D. Thesis, Istanbul Technical University, Graduate School of Science Engineering and Technology, Istanbul TURKEY.
- Ma Z., Cooper P., Daly D., Ledo L. 2012. Existing building retrofits: methodology and state-of-the-art *Energy Build.*, 55:889-902.
- Giombini M., Pinchi E.M. 2015. Energy Functional Retrofitting of Historic Residential Buildings: The Case Study of The Historic Center of Perugia, 70th Conference of the ATI Engineering Association, Rome ITALY.
- Lopez C.S.P., Frontini F. 2013. Energy Efficiency and Renewable Solar Energy Integration in Heritage Historic Buildings, International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, Freiburg GERMANY.
- Pisello A.L., Petrozzi A., Castaldo V L., Cotana F. 2014. Energy refurbishment of historical buildings with public function: pilot case study, *Energy Procedia*, 61: 660-663.
- QI L. 2016. The Conservation and Rehabilitation of Traverse Injection Factory in Derince Port (Turkey), Master Thesis, Politecnico Di Milano, Milano ITALY.
- TS 825. 2008. Thermal insulation requirements for buildings, ICS 91.120.10, Turkish Standards Institute

XII: Validierungsmethoden / Simulationswerkzeuge in der Ausbildung

ENTWICKLUNG UND VALIDIERUNG VON GREY-BOX-MODELLEN ZUR MODELLIERUNG DES THERMISCHEN VERHALTENS VON EINZELBÜROS IN EINEM NIEDRIGENERGIE-BÜROGEBÄUDE

S. Freund¹ und G. Schmitz¹

¹Institut für Technische Thermodynamik, TU Hamburg, Deutschland

Denickestraße 17, 21073 Hamburg

E-Mail: svenne.freund@tuhh.de

KURZFASSUNG

Es werden unterschiedliche Modellstrukturen von Grey-Box-Modellen hinsichtlich ihrer Genauigkeit zur Vorhersage von Raumtemperaturen von Einzelbüros in einem großen Bürogebäude untersucht. Basierend auf einer globalen Sensitivitätsanalyse werden verschiedene Sets an freien Modellparametern definiert, die anschließend mithilfe von Messdaten über Parameteridentifikationsverfahren geschätzt werden. Es zeigt sich, dass bereits das einfachste Grey-Box-Modell in der Lage ist, das thermische Verhalten der Einzelbüros hinreichend genau abzubilden. Des Weiteren steigt mit der Anzahl an freien Parametern die Gefahr einer Überanpassung der Modelle und damit ein Verlust der Generalität und Übertragbarkeit.

EINLEITUNG

Vor dem Hintergrund der Auswirkungen von Energienutzung auf die Umwelt, der Erschöpfung von Primärenergieressourcen und den damit verbundenen ökonomischen Konsequenzen werden weltweit erhebliche Anstrengungen unternommen, umweltfreundliche und energieeffiziente Gebäude zu realisieren. Laut Europäischer Kommission sind etwa 40 % des Primärenergiebedarfs dem Gebäudesektor zuzuordnen (European Commission 2019). Eine Reduzierung des Energiebedarfs von Gebäuden stellt damit eine wichtige Herausforderung im Hinblick auf die Klimaschutzziele dar.

Gerade bei modernen Gebäuden mit bereits hohen Energieeffizienzstandards und einem hohen Automatisierungsgrad ist die Regelung und das Zusammenspiel der einzelnen Gewerke untereinander von entscheidender Bedeutung für die Energieeffizienz und den Nutzerkomfort des gesamten Gebäudes. Dies gilt besonders für Nichtwohngebäude wie z. B. große Bürogebäude. Die Optimierung der Gebäuderegulungsstrategie stellt im Vergleich zu anderen Energiesparmaßnahmen einen kostengünstigen Ansatz dar. Modellbasierte prädiktive Regelung (englisch: *model predictive control*, MPC) von Gebäuden ist ein vielsprechender Ansatz, um den Energiebedarf von Gebäuden zu senken und gleichzeitig den thermischen Nutzerkomfort zu steigern (Serale et al. 2018). Mit der Steigerung von Leistung und Kapazität moderner Rechner und dem zunehmenden großflächigen Einsatz

von Messsensorik in Gebäuden ist die Implementierung von erweiterten, komplexen Regelungsstrategien in den letzten Jahren verstärkt in den Fokus geraten (Sofos et al. 2020). Im Kern von MPC stehen ein oder mehrere Modelle, die das thermische Verhalten des Gebäudes oder einzelner Gebäudezonen vorhersagen können. Von großer Bedeutung sind bei diesen Modellen zum einen eine hohe Genauigkeit, da diese die Performance des gesamten MPC-Reglers beeinflusst (Blum et al. 2019), als auch vertretbare Simulationszeiten, da die Modelle bei der Online-Optimierung ggf. einige hundertmal ausgeführt werden. Daher werden oftmals vereinfachte oder datenbasierte Modellierungsansätze verwendet (Steindl et al. 2019).

In diesem Paper sollen unterschiedliche Modellstrukturen von Grey-Box-Modellen hinsichtlich der Genauigkeit zur Vorhersage des thermischen Verhaltens von Einzelbüroräumen in einem großen Niedrigenergie-Bürogebäude untersucht werden. Ziel ist die Erstellung von geeigneten Modellen, die anschließend zur modellbasierten prädiktiven Mehrzonen-Regelung des hier vorgestellten Gebäudes verwendet werden können. Dabei werden Messdaten aus einem fünfjährigen Langzeitmonitoring des Gebäudes verwendet. Die Modelle sind in der gleichungsbasierten, objektorientierten Modellierungssprache Modelica® (The Modelica Association 2020) implementiert, was eine einfache Formulierung und ein effizientes Lösen von großen nicht-linearen Optimierungsproblemen ermöglicht (Wetter et al. 2016).

GEBÄUDEBESCHREIBUNG

Bei dem hier untersuchten und in Abbildung dargestellten Bürogebäude handelt es sich um den Hauptsitz der beiden Behörden für Energie und Umwelt und Stadtentwicklung und Wohnen in Hamburg, Deutschland. Mit einer Netto-Grundfläche von 46 500 m² bietet das Gebäude Platz für etwa 1500 Arbeitsplätze in 1250 Büroräumen. Es besteht aus zwei 5-geschossigen Seitenflügeln mit insgesamt sieben Flachbauten (bezeichnet als Haus A-D und F-H) und einem 13-stöckigen Hochhaus (bezeichnet als Haus E), siehe Abbildung 1. Errichtet wurde das Gebäude 2013 im Zuge der Internationalen Bauausstellung und im Rahmen der

Forschungsinitiative *Energieoptimiertes Bauen* (EnOB). Mit einem Jahresprimärenergiebedarf von kleiner $70 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und einem maximalen Heizenergiebedarf von $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ als Zielwerte kann das Gebäude als sehr energieeffizient und nachhaltig klassifiziert werden.



Abbildung 1: Außenansicht des Bürogebäudes.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurde das Gebäude von 2014 bis 2017 in einem Intensivmonitoring wissenschaftlich untersucht. Ziel des Monitorings war die Überprüfung der Planungswerte sowie das Herausarbeiten geeigneter Maßnahmen zur Betriebsoptimierung. Mit dem Monitoring konnte beispielsweise gezeigt werden, dass der Planungswert für den Jahresprimärenergiebedarf eingehalten werden konnte, während der Heizwärmebedarf um den Faktor zwei überschritten wird. Um zusätzlich den Nutzerkomfort im Gebäude erheben zu können, sind insgesamt 32 Büros über das gesamte Gebäude verteilt als Referenzräume ausgestattet. In diesen Büros werden u. a. Raumtemperatur, Luftfeuchtigkeit, Präsenz und die Nutzung der Fenster bzw. Lüftungsklappen kontinuierlich aufgezeichnet. Diese im Rahmen des Monitorings erhobenen Messdaten bilden die Grundlage der hier dargestellten Untersuchung.

Einzelbüros

In Abbildung 2 ist die schematische Darstellung eines Standard-Einzelbüros dargestellt.

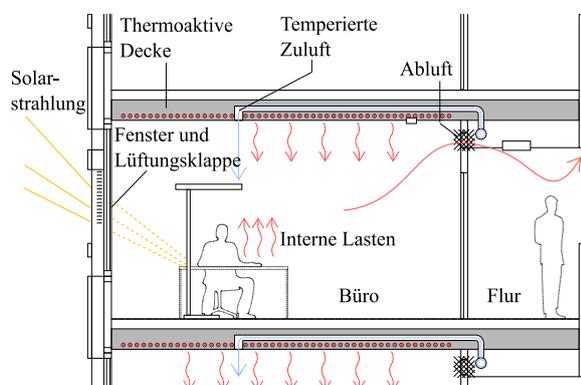


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Einzelbüros (nach sauerbruch hutton 2012).

Grundsätzlich kann zwischen zwei verschiedenen Grundrissen von Büros im Gebäude unterschieden werden. Am häufigsten sind Einzelbüros mit rechteckiger Grundfläche. Daneben gibt es in den Spitzen der geschwungenen Gebäudeteile Büros mit konvexer oder konkaver Außenfassade, die häufig als Doppelbüros ausgelegt sind. Die grundlegenden geometrischen und bauphysikalischen Kennwerte der Einzelbüros sind in Tabelle 1 aufgeführt. Jedes Einzelbüro hat ein offenes Fenster und eine wettergeschützte Lüftungsklappe zur manuellen Belüftung. Die Außenfassade des Gebäudes ist als vorgehängte Elementfassade mit außen angebrachten farbigen Keramikpaneelen realisiert.

Tabelle 1: Grundlegende Kennwerte eines Standard-Einzelbüros.

Beschreibung	Einheit	Wert
Breite	m	2,5
Lichte Deckenhöhe	m	2,89
Grundfläche	m^2	10 - 13
Fensterfläche	m^2	2,63
Fläche der Außenfassade (ohne Verglasung)	m^2	4,6
Wärmedurchgangskoeffizient Verglasung	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	0,7
Wärmedurchgangskoeffizient Fassade (ohne Verglasung)	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	0,9

Im Winterbetrieb werden die Büroflächen über Thermoaktive Decken (TAD), d. h. über eine Betonkernaktivierung der Geschossdecken beheizt, siehe Abbildung 2. Die Belüftung erfolgt im Winter maschinell über die Zufuhr temperiert Zuluft. Im Sommerbetrieb wird das Gebäude ebenfalls über die TAD entwärmt, während die maschinelle Lüftungsanlage nicht im Betrieb ist und eine Belüftung ausschließlich manuell über die Fenster bzw. Lüftungsklappen erfolgt.

Heizungsanlage

Das Heizungssystem des Gebäudes basiert hauptsächlich auf der Nutzung von oberflächennaher Geothermie in Verbindung mit zwei elektrisch betriebenen Wärmepumpen. Zur Brauchwassererwärmung und zur Spitzenlastabdeckung ist zusätzlich der Anschluss an ein Nahwärmenetz vorhanden. Jedes der acht Gebäudeteile besitzt zwei nach Himmelsrichtung unterschiedene TAD-Regelkreise. Die Vorlauftemperaturen der TAD-Regelkreise werden aktuell über lineare, außentemperaturgeführte Heizkurven in Verbindung mit einem einfachen Zeitplan geregelt.

GREY-BOX-MODELLIERUNG

Bei Grey-Box-Modellen handelt es sich um einen vereinfachten Modellierungsansatz, bei dem das thermische Verhalten von Gebäuden oder einzelnen Zonen in Gebäuden in Analogie zur Elektrotechnik über Widerstands-Kapazitätsnetzwerke abgebildet

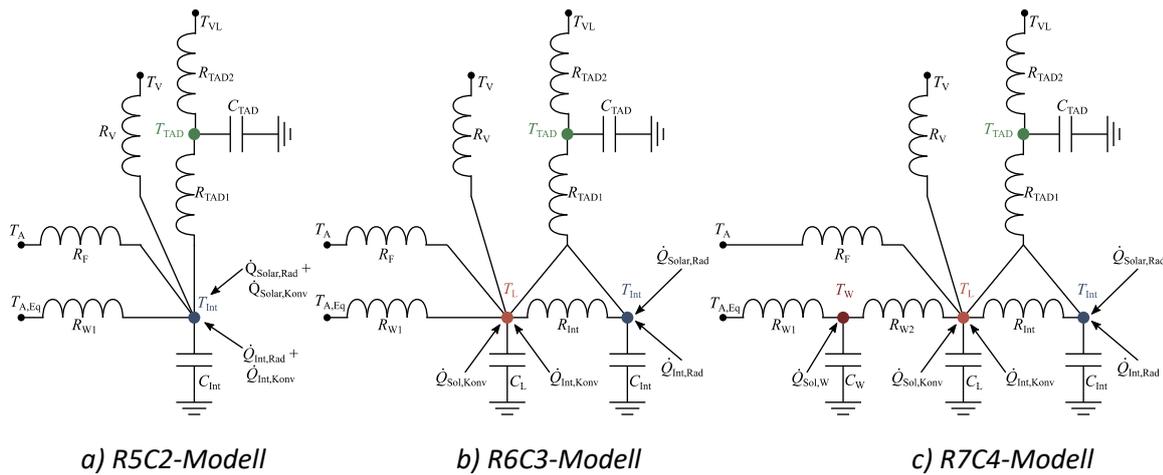


Abbildung 3: RC-Netzwerk-Darstellung der untersuchten Grey-Box-Modelle.

wird. Die physikalischen Parameter der Modelle (thermische Widerstände R und Kapazitäten C) werden dann aus gemessenen Input- und Outputdaten über geeignete Parameteridentifikationsverfahren bestimmt. Wie der Name suggeriert, stehen Grey-Box-Modelle zwischen rein datenbasierten Black-Box-Modellen (z. B. neuronalen Netzen) und detailliert-physikalischen White-Box-Modellen („klassische“ Gebäudesimulation mit z. B. TRNSYS oder EnergyPlus). Sie vereinen damit die Vorteile einer hohen Effizienz im Sinne kurzer Simulationszeiten und einer geringen Anzahl an Gleichungen sowie einer meist sehr hohen Genauigkeit. Für MPC-Anwendungen wurden Grey-Box-Modelle bereits erfolgreich eingesetzt. Beispielsweise haben (Viot et al. 2018) und (Coninck und Helsen 2016) den Erfolg von MPC mit der Nutzung von Grey-Box-Modellen in praktischen Umsetzungen gezeigt.

Modellstrukturen

Die in dieser Arbeit untersuchten Grey-Box-Modellstrukturen sind in Abbildung dargestellt. Die Modelle unterscheiden sich hinsichtlich der Komplexität in der Anzahl der Widerstände und Kapazitäten. Letztere bestimmen die Anzahl der Zustandsvariablen des Systems und sind damit in Hinblick auf eine spätere Closed-Loop-Anwendung mit geeigneten Zustandsschätzverfahren von besonderer Bedeutung. Diese drei verschiedenen Grey-Box-Modelle werden für drei verschiedene Referenzbüroräume trainiert und anschließend validiert. Die untersuchten Büroräume liegen im dritten Obergeschoss in einem der Flachbauten und unterscheiden sich hinsichtlich der Größe und Ausrichtung. Die Daten der drei Referenzbüroräume sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 22: Daten der untersuchten Referenzbüroräume.

Bezeichnung	Ausrichtung	Grundfläche
Büro SW	Südwest (220°)	10,22 m ²
Büro NW	Nordwest (340°)	12,72 m ²
Büro O	Ost (96°)	12,61 m ²

Wie in Abbildung 3 zu erkennen ist, sind die TAD als eigenständiges R2C1-Modell implementiert. Die Startwerte der Widerstände R_{TAD1} und R_{TAD2} sind mithilfe von Konstruktionsdaten nach dem von (Koschenz und Lehman, 2000) entwickelten EMPA Modell bestimmt. Als Inputdaten für das TAD-Modell dient die Vorlauftemperatur des jeweiligen Heizkreises T_{VL} .

Die mechanische Belüftung wird als einfacher thermische Widerstand mit

$$R_V = \frac{1}{\dot{V}_L \cdot \rho_L \cdot c_L} \quad (1)$$

wobei $\dot{V}_L = 20 \text{ m}^3/\text{h}$ der Zuluftvolumenstrom, ρ_L die Dichte von Luft und c_L die Wärmekapazität von Luft ist. Als Input wird die Zulufttemperatur T_V verwendet. Für den Wärme- und Strahlungsaustausch der Außenfassade mit der Umgebung wird ein vereinfachter Ansatz nach VDI 6007 (Verein Deutscher Ingenieure, 2015) verwendet. Hierbei wird die äquivalente Außentemperatur $T_{A,Eq}$ nach Gleichung (2) bestimmt:

$$T_{A,Eq} = T_A + I_{G,\{N,S,W,O\}} \frac{\alpha_F}{\alpha_A} \quad (2)$$

Dabei ist $\alpha_F = 0,5$ der Absorptionskoeffizient für kurzwellig Strahlung, $\alpha_A = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ der äußere Wärmeübergangskoeffizient (DIN EN ISO 6946 2018), $I_{G,\{N,S,W,O\}}$ die gemessene Globalstrahlung auf die entsprechend orientierte Außenfassade und T_A die am Gebäude gemessene Außenlufttemperatur. Die Wärmegewinne durch das Eintreffen von Solarstrahlung durch das Fenster werden über Gleichung (3) bestimmt.

$$\dot{Q}_{Sol} = f_{Sol} \cdot I_{G,\{N,S,W,O\}} \quad (3)$$

Der Parameter f_{Sol} stellt die für die Solarstrahlung effektive Fensterfläche dar und kann als freier Parameter im Identifikationsverfahren behandelt werden. Die internen Lasten durch Personen und Arbeitsgeräte werden über das aufgezeichnete Binärsignal des Präsenzsensors und einem damit verbundenen konstanten Wärmegewinn \dot{Q}_{Int} bestimmt.

Tabelle 3: Beschreibung und Startwerte der Modellparameter.

Parameter	Beschreibung	Startwert
R_{W1}	Thermischer Widerstand Außenfassade (innen)	1,11 $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$
R_{W2}	Thermischer Widerstand Außenfassade (außen)	0,05 $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$
C_W	Kapazität der Außenfassade	$8,5 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{m}^2\text{K}}$
R_F	Thermischer Widerstand des Fensters	1,43 $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$
R_{TAD1}	Thermischer Widerstand zw. TAD und Zone	0,183 $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$
R_{TAD2}	Thermische Widerstand zw. Vorlauftemperatur und TAD	0,122 $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$
C_{TAD}	Kapazität der TAD	$7 \cdot 10^5 \frac{\text{J}}{\text{m}^2\text{K}}$
\dot{Q}_{Int}	Interne Wärmegewinne	15 $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
R_{Int}	Thermischer Widerstand zw. Raumluft und interner Masse	0,18 $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$
C_{Int}	Kapazität der internen Masse	$1,82 \cdot 10^5 \frac{\text{J}}{\text{m}^2\text{K}}$
R_V	Thermischer Widerstand mechanische Belüftung	0,15 $\frac{\text{K}}{\text{W}}$
f_{Sol}	Effektive Fensterfläche	0 – 0,2

Ein bedeutender Unterschied zwischen dem einfachsten R5C2-Modell in Abbildung 3a und den beiden komplexeren Modellen ist die Aufteilung der Wärmegewinne in Strahlung und Konvektion. Die Strahlungsanteile wirken auf die interne Masse, während der konvektive Anteil direkt auf das Raumluftvolumen wirkt. Dabei werden die Anteile wie folgt aufgeteilt: interne Wärmegewinne: 60 % Strahlung, 40 % Konvektion; Wärmegewinne durch Solarstrahlung: 90 % Strahlung, 10 % Konvektion; Wärmegewinne durch TAD: 80 % Strahlung, 20 % Konvektion.

Sensitivitätsanalyse

Den ersten Schritt in der Parameterabschätzung stellt eine globale Sensitivitätsanalyse aller freien Parameter dar. In Abbildung 4 ist exemplarisch die Sensitivität (hier dargestellt als Mittelwerte der Elementareffekte) der Parameter auf die simulierte Raumtemperatur (Temperatur der Kapazität C_{Int} in Abbildung 3a bzw. C_L Abbildung 3b und 3c) für das R7C4-Modell des nach Südwesten ausgerichteten Büros dargestellt.

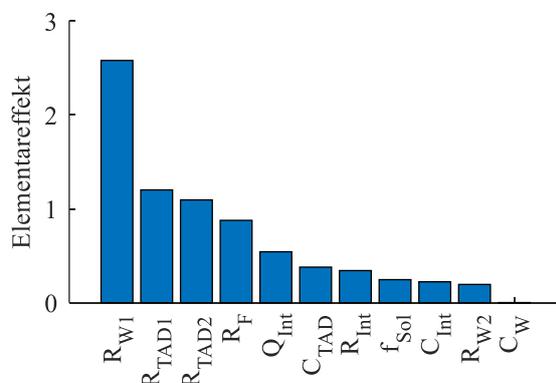


Abbildung 4: Sensitivität der Parameter für das R7C4-Modell des Büros in Südwestausrichtung.

Hierbei wurde die Methode nach Morris (Morris 1991) aus der frei verfügbaren MATLAB Toolbox

Global Sensivity Analysis (Pianosi et al. 2015) zur Bestimmung der Elementareffekte genutzt. Die Parameter werden dabei in einem Bereich von $\pm 80\%$ von den in Tabelle 3 gegebenen Startwerten variiert. Aus Abbildung 4 ist zu erkennen, dass die vier Parameter R_{W1} , R_{TAD1} , R_{TAD2} und R_F die dominanten Parameter sind. Auf Basis der Sensitivitäten werden die in Tabelle dargestellten 6 verschiedenen Parametersets definiert, wobei jeweils die Anzahl der freien Parameter sukzessive in der Reihenfolge der Sensitivitäten erhöht wird. Neben den vier genannten Parametern wird zusätzlich noch Parameter \dot{Q}_{Int} mit in die Betrachtung einbezogen. Die aus der Sensitivitätsanalyse erhaltenen Erkenntnisse, d. h. die Reihenfolge der Parametersensitivitäten sind grundlegend auch für die anderen betrachteten Modellstrukturen, Büros und Zeiträume übertragbar. Eine Ausnahme stellt hier der Parameter f_{Sol} dar, der zum einen von der Ausrichtung der Büros abhängig ist und zum anderen stark von der Intensität der Solarstrahlung im betrachteten Zeitraum beeinflusst wird. Es wird daher für die Büros in Ost- und Südwestausrichtung ein zusätzliches Parameterset (Set 5*) definiert, das den Parameter f_{Sol} mitberücksichtigt. Für das Büro in Nordwestrichtung wird der Einfluss der Solarstrahlung im Winter als vernachlässigbar angesehen und der Parameter auf $f_{Sol} = 0$ gesetzt.

Parameterschätzung

Bei der Parameterschätzung werden die freien Parameter über ein Optimierungsproblem mithilfe bekannter Input- und Outputdaten geschätzt. Die zu minimierende Zielfunktion ist hier definiert als der mittlere absolute Fehler (englisch: *mean absolute error*, MAE) zwischen gemessener und simulierter Raumtemperatur:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |T_{Mess} - T_{Sim}| \quad (4)$$

Tabelle 5: Parametersets für das Training der Grey-Box-Modelle.

Parameter	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4	Set 5	Set 5*
R_{W1}	X	X	X	X	X	X
R_{TAD1}		X	X	X	X	X
R_{TAD2}			X	X	X	X
R_F				X	X	X
\dot{Q}_{Int}					X	X
f_{Sol}						X

Als Eingangstrainingsdaten werden Messdaten aus dem Gebäudemonitoring verwendet. Die Parameteridentifikation mit „echten“ Messdaten stellt im Gegensatz zu synthetisch, d. h. simulativ erzeugten Trainingsdaten eine besondere Herausforderung dar. Da diese Daten im Vollbetrieb des Gebäudes erhoben wurden, können die Trainingsdaten teils erhebliche nicht messbare Störgrößen enthalten. Ein besonderes Augenmerk muss daher auf die Generalität und Übertragbarkeit der trainierten Modelle auf andere Zeiträume gelegt werden. Für jedes der drei Büros werden fünf Trainingsdatensätze im Umfang von jeweils 21 Tagen innerhalb der Heizperiode (Monate Dezember bis März) verwendet. Die Grey-Box-Modelle werden mit allen fünf Datensätzen trainiert und in den jeweils übrigen vier Datensätzen validiert, sodass sich für jedes Modell insgesamt 20 Validierungsdatensätze ergeben. Diese Vorgehensweise wird für alle sechs in Tabelle 5 definierten Parametersets durchgeführt. Zusätzlich zu diesen Parametersets wird jeweils eine Parameteridentifikation aller Modellparameter durchgeführt. Als Startwerte für die Parameter werden die in Tabelle 5 gegebenen Werte verwendet. Wie bereits bei der Sensitivitätsanalyse, werden die unteren und oberen Parametergrenzen mit $\pm 80\%$ vom Startwert festgelegt.

Für die Lösung des Optimierungsproblems wird die MATLAB Optimization Toolbox (MathWorks 2019) verwendet, zu der eine Schnittstelle zu den Modelica-Modellen implementiert wurde. Es wird eine zweistufige Optimierung bestehend aus dem Surrogate Optimization Solver und Patternsearch durchgeführt.

ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Abbildung zeigt die Verteilung der mittleren absoluten Fehler in den Validierungszeiträumen der drei verschiedenen Referenzbüros und der drei unterschiedlichen Grey-Box-Modelle. Die Fehler der fünf Trainingsdatensätze sind hierbei nicht enthalten.

Zunächst werden hier die Ergebnisse für die Referenzräume Südwest und Nordwest betrachtet, da diese vergleichbar sind. Die MAE-Werte der beiden Büros weisen in Bereich von $0,1\text{ °C}$ bis $0,5\text{ °C}$ auf. Es zeigt sich hierbei eine eindeutige Abhängigkeit vom trainierten Parameterset. Die Parametersets mit den niedrigsten medianen bzw. mittleren MAE-Werten sind Parameterset 3 und 4. Es lässt sich

erkennen, dass ein Hinzufügen des Fensterwiderstandes R_F (Parameterset 4) keine Reduzierung der Fehler bewirkt, d. h. die Fehlerverteilungen bleiben im Vergleich zu Parameterset 3 nahezu identisch. Vor allem beim R5C2-Modell und R6C3-Modell lässt sich dies damit begründen, dass der Außenwandwiderstand und der Fensterwiderstand die gleiche physikalische Bedeutung haben und damit einer der beiden Parameter redundant ist. Obwohl der Außenwandwiderstand im R7C4-Modell auf zwei Widerstände und eine Kapazität aufgeteilt ist, zeigt sich auch hier das gleiche Verhalten. Dies deutet darauf hin, dass die thermische Kapazität der Außenwand aufgrund der konstruktiven Bauweise als Elementfassade von untergeordneter Bedeutung ist.

Mit zunehmender Anzahl an freien Parametern (Parameterset 5 bzw. 5* und alle Parameter frei) werden sowohl der mediane MAE-Wert, als auch die Verteilung der Fehler größer. Die ist ein Hinweis auf eine Überanpassung („Overfitting“) der Modelle, d. h., dass beim Training ein lokales Minimum gefunden wurde, dessen Parameter weniger übertragbar auf andere Zeiträume sind. Die Wahrscheinlichkeit, dass beim Lösen des Optimierungsproblems ein solches lokales Minimum gefunden wird, steigt mit zunehmender Anzahl an Optimierungsvariablen. Ähnliche Erkenntnisse wurden auch schon von (Brastein et al. 2018) gefunden. Es ist in diesem Fall also zielführender, die Anzahl an freien Parametern auf nur die einflussreichsten zu beschränken. Welche Parameter dabei trainiert werden, muss im Einzelfall, z. B. über die hier vorgestellte Sensitivitätsanalyse entschieden werden. Ein Training mit einer reduzierten Anzahl an Parametern ist darüber hinaus deutlich effizienter und schneller.

Ein etwas anderes Bild zeigt sich bei dem Referenzbüroraum Ost, siehe Abbildungc. Auch hier zeigt sich eine eindeutige Abhängigkeit vom trainierten Parameterset, jedoch ist hier kein eindeutiges Overfitting zu erkennen, wenn alle Parameter als frei behandelt werden. Es ist hier im Gegenteil zu den anderen beiden Büroräumen zu erkennen, dass dieses Parameterset im Hinblick auf die Fehlerverteilung sogar als das beste bezeichnet werden kann. Es ist auch zu sehen, dass das Hinzufügen des Parameters f_{Sol} (Parameterset 5*) eine eindeutige Reduktion der Modellfehler bewirkt.

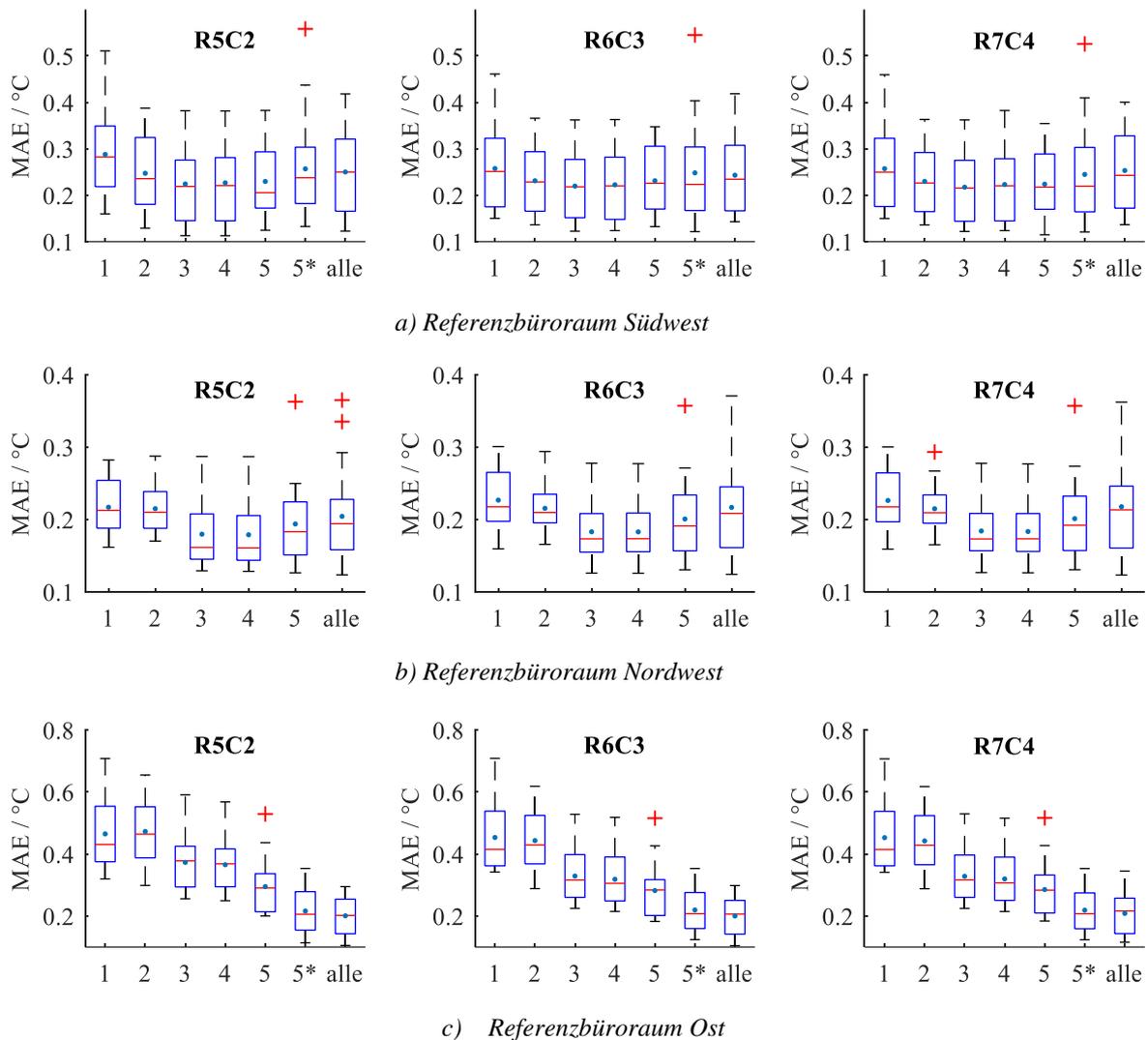


Abbildung 5: Verteilung der mittleren absoluten Fehler in den Validierungszeiträumen der drei Referenzbürräume und der drei verschiedenen Grey-Box-Modelle. Blaue Box: unteres bzw. oberes Quartil; Rote horizontale Linie: Medianwert; Blauer Punkt: Mittelwert; Schwarze Linie: Whisker ($1,5 \times IQR$); Rotes Kreuz: statistische Ausreißer.

Die Wärmegewinne durch Solarstrahlung sind also für nach Osten ausgerichtete Bürräume auch im Winter von Bedeutung.

Ebenfalls ist aus Abbildung 5 zu erkennen, dass sich mit allen drei untersuchten Grey-Box-Modellen und dem entsprechenden Parameterset sehr gut übertragbare Modelle trainieren lassen. Im Falle des Bürraums Südwest befinden sich 50 % der mittleren absoluten Fehler in einem Bereich von $0,15 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$, im Falle des Bürraums Nordwest im Bereich von $0,15 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ und beim Bürraum Ost im Bereich $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Eine solche Genauigkeit kann für MPC-Anwendungen als ausreichend betrachtet werden.

In Tabelle 6 sind die mittleren MAE-Werte des jeweils besten Parametersets für die verschiedenen Grey-Box-Modelle dargestellt. Es stellt sich heraus, dass sich die mittleren MAE-Werte zwischen den einzelnen Modellen kaum unterscheiden, d. h., dass die

Modellkomplexität kaum einen Einfluss auf die Modellgüte hat. Der physikalische Unterschied

zwischen dem R5C2-Modell und dem R6C3-Modell ist die Aufteilung der inneren thermischen Kapazitäten in Raumluft und interne Masse und damit einhergehen die Aufteilung der Wärmegewinne in Konvektion und Strahlung.

Tabelle 6: Mittlerer MAE-Werte des jeweils besten Parametersets.

MAE	R5C2	R6C3	R7C4
Büro SW	$0,224 \text{ }^\circ\text{C}$	$0,220 \text{ }^\circ\text{C}$	$0,217 \text{ }^\circ\text{C}$
Büro NW	$0,179 \text{ }^\circ\text{C}$	$0,183 \text{ }^\circ\text{C}$	$0,183 \text{ }^\circ\text{C}$
Büro O	$0,201 \text{ }^\circ\text{C}$	$0,200 \text{ }^\circ\text{C}$	$0,209 \text{ }^\circ\text{C}$

Dies bewirkt jedoch keine nennenswerte Verbesserung der Modellgenauigkeit. Eine Begründung kann hier darin liegen, dass die

Wärmegewinne aus internen Lasten, Solarstrahlung und TAD überwiegend als Wärmestrahlung angenommen werden und damit kaum konvektive Wärmegewinne vorhanden sind.

Eine Aufteilung würde ggf. bei Warmluftheizungen oder anderen Konvektionsheizungen einem deutlichen größeren Effekt erzielen.

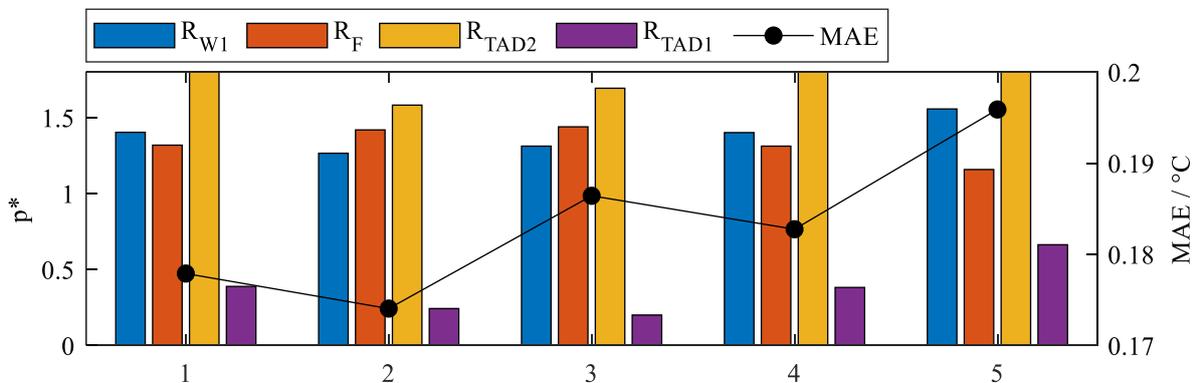


Abbildung 6: Ergebnisse der Parameteridentifikation in den fünf Trainingszeiträume für das Set 4 des R7C4-Modells für das Referenzbüro Nordwest. Die Werte der Parameter sind normiert auf die jeweiligen Startwerte. Auf der rechten y-Achse sind die mittleren MAE-Werte der Validierungszeiträume aufgetragen.

Des Weiteren lässt sich daraus schlussfolgern, dass die TAD maßgeblich für die thermische Trägheit und damit das dynamische Verhalten der Büros verantwortlich ist. Die thermische Kapazität der inneren Massen, die hauptsächlich aus Innenwänden und Mobiliar bestehen, sind dazu im Vergleich vernachlässigbar klein.

Wie bereits erläutert, ist der Unterschied zwischen dem R6C3-Modell und dem R7C4-Modell die Beschreibung der Außenwand mit zwei Widerständen und einer Kapazität. Auch hier zeigt sich keine nennenswerte Verbesserung der Modelgüte. Dies unterstützt die These, dass die thermische Speicherfähigkeit der Elementfassade vernachlässigt werden kann.

In Abbildung 6 ist exemplarisch das Ergebnis der Parameteridentifikation in den fünf unterschiedlichen Trainingszeiträumen für das R7C4-Modells des Referenzbüroriums Nordwest gezeigt. Dargestellt sind die auf die jeweiligen Startwerte normierten und geschätzten Werte der Parameter des Parametersets 4 sowie die mittleren MAE-Werte der Validierungszeiträume. Es ist zu erkennen, dass sich die Werte der geschätzten Parameter zwischen den Trainingszeiträumen teilweise deutlich unterscheiden. Die Parameter konvergieren damit nicht gegen ein globales Minimum, d. h. es gibt nicht das eine allgemeingültige Parameterset, sondern eine Vielzahl an lokalen Minima. Es ist auch nicht erwartbar, dass mit den im Betrieb erhobenen Messdaten ein globales Parameterset gefunden werden kann, da der Anteil an nicht messbaren Störgrößen zu groß ist. Ebenfalls ist aus Abbildung zu erkennen, dass sich die Werte des Parameters R_{TAD2} bei den Parametersets 1, 4 und 5 an der oberen Grenze (1,8-fache des Startwertes) befindet. Ob bei der Wahl eines größeren

Parameterbereichs ein besseres Parameterset gefunden werden kann, muss ggf. weiter untersucht werden. Der Modelgüte in Hinblick auf die mittleren absoluten Fehler in den Validierungszeiträumen kann jedoch mit allen geschätzten Parametersets als hinreichend genau und übertragbar angesehen werden, wie auch in Abbildung 5b zu erkennen ist.

ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Arbeit wurden drei verschiedene Grey-Box-Modellstrukturen für drei Einzelbüroräume in einem großen Niedrigenergie-Bürogebäude untersucht. Es hat sich dabei gezeigt, dass mit allen untersuchten Modellstrukturen übertragbare und für regelungstechnische Anwendungen hinreichend genaue Modelle trainieren lassen und sich somit das thermische Verhalten der Büros vorhersagen lässt. Es zeigt sich außerdem, dass es oftmals zielführender und effizienter ist, die Identifikation mit einer geringen Anzahl an freien Parametern durchzuführen. Dies vermeidet eine mögliche Überanpassung und erhöht damit die Generalität der Modelle.

In weiterführenden Arbeiten werden die hier erstellen Grey-Box-Modelle für die Entwicklung eines modellbasierten prädikativen Reglers verwendet, der dann in dem beschriebenen Gebäude zum praktischen Einsatz kommt. Die hier vorgestellten Ergebnisse können darüber hinaus bestätigt bzw. erweitert werden, indem für alle 32 in dem Gebäude vorhandenen Referenzräume mit dem hier dargestellten Ansatz Modelle erstellt und trainiert werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- Blum DH, Arendt K, Rivalin L, Piette MA, Wetter M, Veje CT, 2019. Practical factors of envelope model setup and their effects on the performance of model predictive control for building heating, ventilating, and air conditioning systems. *Applied Energy*, 236, 410–425. Abgerufen am 11.12.2018.
- Brastein OM, Perera DWU, Pfeifer C, Skeie N-O, 2018. Parameter estimation for grey-box models of building thermal behaviour. *Energy and Buildings*, 169, 58–68. Abgerufen am 28.05.2018.
- Coninck R de, Helsen L, 2016. Practical implementation and evaluation of model predictive control for an office building in Brussels. *Energy and Buildings*, 111, 290–298. Abgerufen am 09.10.2017.
- DIN EN ISO 6946. Bauteile – Wärmehdurdhlasswiderstand und Wärmehdurdhgangskoeffizient – Berechnungsverfahren, 2018. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- European Commission, 2019. EU transport in figures. Statistical pocketbook 2019. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 1 online resource.
- Koschenz M, Lehman B, 2000. Thermoaktive Bauteilsysteme tabs. EMPA Energiesysteme/Haustechnik, Dübendorf, 102 S.
- MathWorks, 2019. Optimization Toolbox™ User's Guide. 2019b, unveröffentlicht, Natick, MA.
- Morris MD, 1991. Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments. *Technometrics*, 33, 161–174. Abgerufen am 06.12.2018.
- Pianosi F, Sarrazin F, Wagener T, 2015. A Matlab toolbox for Global Sensitivity Analysis. *Environmental Modelling & Software*, 70, 80–85. Abgerufen am 05.10.2018.
- sauerbruch hutton, 2012. Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt in Hamburg Wilhelmsburg. Der Neubau - Gebäude und Energiekonzept.
- Serale G, Fiorentini M, Capozzoli A, Bernardini D, Bemporad A, 2018. Model Predictive Control (MPC) for Enhancing Building and HVAC System Energy Efficiency: Problem Formulation, Applications and Opportunities. *Energies*, 11 (3), 631.
- Sofos M, Langevin J, Deru M, Gupta E, Benne KS, Blum D, Bohn T, Fares R, Fernandez N, Fink G, Frank S, Gerbi J, Granderson J, Hoffmeyer D, Hong T, Jiron A, Johnson S, Katipamula S, Kuruganti T, Livingood WC, Muehleisen R, Neukomm M, Nubbe V, Phelan P, Piette M, Reyna J, Roth A, Satre-Meloy A, Specian M, Vrabie D, Wetter M, Widergren S, 2020. Innovations in Sensors and Controls for Building Energy Management. Research and Development Opportunities Report for Emerging Technologies, unveröffentlicht.
- Steindl G, Kastner W, Stangl V, 2019. Comparison of Data-Driven Thermal Building Models for Model Predictive Control. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 7 (4), 730–742. Abgerufen am 06.11.2019.
- The Modelica Association, 2020. Modelica. Modelica Association.
- Verein Deutscher Ingenieure, 2015. Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden. Raummodell. Beuth Verlag, Berlin.
- Viot H, Sempey A, Mora L, Batsale JC, Malvestio J, 2018. Model predictive control of a thermally activated building system to improve energy management of an experimental building. Part II - Potential of predictive strategy. *Energy and Buildings*, 172, 385–396. Abgerufen am 28.05.2018.
- Wetter M, Bonvini M, Nouidui TS, 2016. Equation-based languages – A new paradigm for building energy modeling, simulation and optimization. *Energy and Buildings*, 117, 290–300. Abgerufen am 24.10.2017.

IMPLEMENTIERUNG UND VALIDIERUNG EINES ALGORITHMUS ZUR THERMISCHEN SIMULATION VON TRANSPARENTEN BAUTEILEN

C. Conrad¹, J. Grunewald¹ und H. Fechner¹

¹Institut für Bauklimatik, TU Dresden, 01062 Dresden, Deutschland

Tel.: + 49 351 463 32911 Fax: +49 351 463 32627

E-Mail: Christian.Conrad@tu-dresden.de

KURZFASSUNG

Bei einem Langzeitmonitoring wurde ein thermisches Verhalten von hochgedämmten Kastenfenstern bis hin zu Schäden an der Verglasung beobachtet, welche mit den herkömmlichen normativen Berechnungsverfahren mit einer getrennten Betrachtung der Strahlungsvorgänge und der Konvektion nicht nachvollzogen werden konnten. Mit zunehmender Verbesserung der Wärmedämmung der Verglasung nehmen die Temperaturdifferenzen und damit das Schadensrisiko infolge der höheren Absorption der kurzwelligen Strahlung und damit die thermischen Spannungen in den Verglasungskonstruktionen zu.

Mit der Implementierung eines Algorithmus zur thermischen Simulation von transparenten Bauteilen steht ein validiertes Werkzeug für eine zeitlich und räumlich detailliertere Auflösung zur Schadens- und Risikobewertung von Fenstern zur Verfügung.

ABSTRACT

During long-term monitoring, a thermal behaviour of highly insulated box-type windows up to damages of the glazing was observed, which could not be reconstructed with the conventional normative calculation methods with a separate consideration of the radiation and convection processes. With increasing improvement of the thermal insulation of the glazing, the temperature differences and thus the risk of damage increase due to the higher absorption of short-wave radiation and thus the thermal stresses in the glazing structures.

With the implementation of an algorithm for the thermal simulation of transparent components, a validated tool for a temporally and spatially more detailed resolution is available for the damage and risk assessment of windows.

EINLEITUNG

Der Klimaschutz ist eine Herausforderung und eine Verantwortung insbesondere gegenüber den nachfolgenden Generationen. Ein Baustein zum Klimaschutz ist die erhebliche Senkung des Energieverbrauches der bestehenden Gebäude. Bei der Sanierung von älteren oder gar zu Denkmälern erklärten Gebäuden stellt die Erhaltung der Originalsubstanz und des Erscheinungsbildes erhöhte Anforderungen an alle am Bau Beteiligten. Für eine energetische Ertüchtigung von historischen Fenstern,

welche auch zukünftigen Anforderungen an den Klimaschutz genügen, sind eine detaillierte Planung und bauphysikalische Betrachtung notwendig.

Die Implementierung und Validierung eines Algorithmus zur thermischen Simulation von transparenten Bauteilen möchte einen Beitrag leisten, damit zukünftig das thermische Verhalten der einzelnen Bestandteile (Verglasung, Randverbund, Rahmen) des energetisch ertüchtigten Fensters realitätsnah simuliert und bewertet werden kann.

MODELLGEBÄUDE IN GÖRLITZ

Durch die modellhafte Sanierung des barocken Gebäudes wurde unter Beachtung der gestalterischen und denkmalpflegerischen Belange das praktisch mögliche Einsparpotenzial im Bereich des Primärenergie-, Trink- und Abwasserverbrauchs quantifiziert.



Abbildung 1: Straßenansicht Handwerk 15 in Görlitz/ D vor und nach der Sanierung [Conrad, C.]

Kastenfenster des Modellgebäudes

Bei den in Eigenregie gefertigten Holz-Kastenfenster mit 2-Scheiben-Wärmeschutzverglasung (WSV) aus Solarglas/ Diamantglas wurden die für den Klassizismus typischen Fensterprofile und Schlagleistengetriebe eingesetzt.

Messungen und Beobachtungen

Die Hauptaufgabe des Langzeitmonitorings war das Aufzeigen des möglichen Energieeinsparpotenzials beim Heizwärmeverbrauch und bei der regenerativen Energiebereitstellung bei denkmalgeschützten Gebäuden. Zusätzlich wurden 12 Messstrecken in den

Bauteilen verbaut. Darunter ist jeweils eine Messstrecke auf der Nord- und Südseite im und am Kastenfenster sowie im 2. Dachgeschoss auf der Nordseite beim Dachliegefenster.

Es werden die Scheibenoberflächentemperaturen, die Temperatur im Kastenzwischenraum (KZR), die Globalstrahlung und die Außen- und Innenklimadaten aufgezeichnet. Zur Erfassung der Oberflächentemperaturen wurden die ca. 1 mm kugelförmige Ntc-Fühler ca. 12 cm vom Randverbund positioniert, um die Laibungs- und Eigenverschattung und den Einfluss des Randverbundes zu minimieren. Die Zuleitung und der Fühler wurden mit speziellem Klarsilikon an die Glasoberfläche angebunden. (siehe Abb. 2).

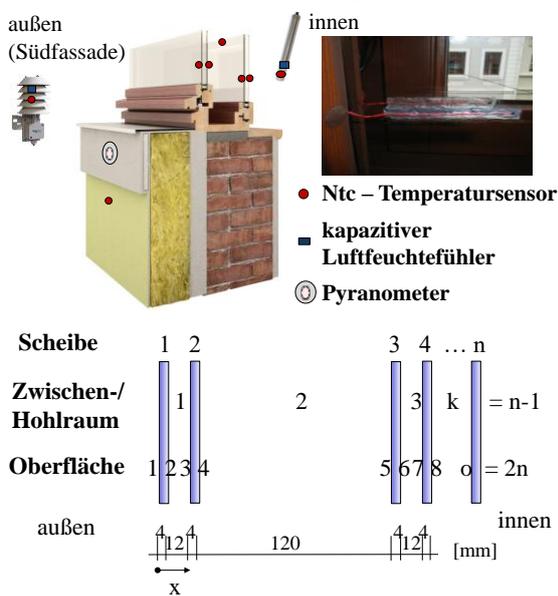


Abbildung 2: Aufbau der Messstrecke Kastenfenster, 1. DG Süd, Nummerierungsdefinition [Conrad]

Die Temperaturen auf der Südseite steigen nur nachts von außen nach innen an. Die maximale Globalstrahlung (\perp zur Fassade) im Beispiel-Zeitraum Juli 2017 liegt bei ca. 800 W/m^2 . Die maximale Scheibenoberflächentemperatur auf der Außenseite beträgt ca. $48 \text{ }^\circ\text{C}$ und auf der Innenseite ca. $30 \text{ }^\circ\text{C}$ (siehe Abb. 3). Durch die Absorption der kurzwelligeren Strahlung steigt die Temperatur im Fensterkasten auf über $53 \text{ }^\circ\text{C}$ an (siehe T_{04} Abb. 11) an. Es findet eine Umkehrung der Transmissionsrichtung statt: von der Energie vom Fensterkasten in Richtung Innenraum und gleichzeitig auch nach außen. In der Übergangszeit, bei flachem Einstrahlungswinkel ist dieser Effekt erwünscht. In der Hitzeperiode wirken die Balkone bei den darunterliegenden Geschossen als Verschattung. Bei drei Fenstern ohne Verschattung ist auf der Südseite im Bereich der Wiener Sprosse jeweils ein Spannungsriss in der Übergangszeit aufgetreten. Dabei ist die äußerste Scheibe betroffen.

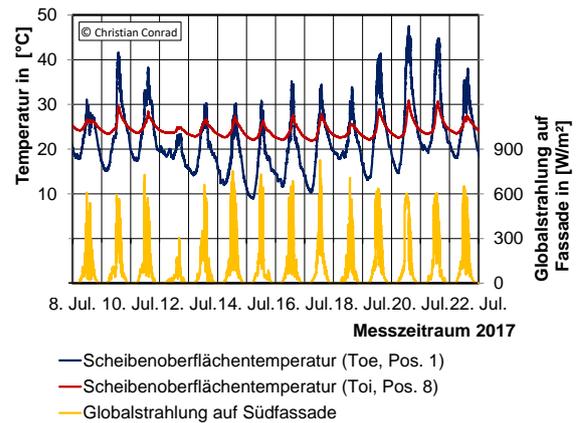


Abbildung 3: Verlauf der Scheibenoberflächentemperaturen und der Globalstrahlung [Conrad]

Auf den horizontalen Flächen der Fenster, wie zum Beispiel dem Wetterschenkel, den Sprossen und den Querstücken der Flügel, sind Risse und Farbablagerungen der Dickbeschichtung zu verzeichnen. Dieses Schadbild tritt nur an den Fenstern der Südfassade ohne Verschattung auf und wird im Wesentlichen durch den thermischen Stress infolge der stark wechselnden Oberflächentemperaturen verursacht (siehe Abb. 4).



Abbildung 4: Kastenfenstertür Südseite ohne Verschattung, Riss in der äußeren Scheibe der außenliegenden WSV, Farbablagerungen der Dickbeschichtung [Conrad]

HERLEITUNG UND ANWENDUNG DES AUFGESTELLTEN SIMULATIONS-ALGORITHMUS

Die normativen Berechnungsverfahren für die Ermittlung der Kennwerte der Verglasung betrachten die Strahlungsvorgänge [DIN EN 410] und die thermischen Wärmetransportprozesse zur Ermittlung des Ug-Wertes [DIN EN 673] unter stationären Randbedingungen getrennt voneinander.

Anhand des aufgestellten Modells zur thermischen Simulation der Strahlung, Konvektion und Wärmeleitung können transparente Bauteile und deren Bauteilanschlüsse unter Realklimabedingungen

simuliert werden. Ziel ist die Sicherstellung der Dauerhaftigkeit und die energetische Optimierung der Konstruktion sowie die Beurteilung der Behaglichkeit anhand der Oberflächentemperatur der Verglasungen. Das am Institut für Bauklimatik entwickelte Programm [DELPHIN] ist ein numerisches Simulationsprogramm für den gekoppelten Wärme-, Feuchte-, Luft- und Salztransport für 1D-, 2D- und 3D-Probleme, welches auf der Finite-Volumen-Methode beruht. Dieses Programm zur Berechnung von opaken Bauteilen wurde um die Konvektion und die Absorption ergänzt und zu einem Programm zur Berechnung von transparenten Bauteilen weiterentwickelt. Zusätzlich können damit unter Berücksichtigung der Feuchtespeicherung hygrothermisch realistische Schadensprognosen (Holzerstörung und Rissbildung bei Scheiben) in der Ingenieurpraxis erstellt werden. Im Vergleich zur CFD-Simulation/ Multiphysik wird nur ein Bruchteil der Rechenleistung bzw. -zeit benötigt.

Randbedingungen und Geometrie

Die Innen- und Außentemperatur sowie die kurzwellige und langwellige Strahlung sind die wesentlichen äußeren Randbedingungen, welche auf das transparente Bauteil einwirken. Im Zusammenhang mit der Bauteilsimulation können die relative Luftfeuchte, der Wind, die Windrichtung und der Regen mit berücksichtigt werden. Für die Geometrie des transparenten Bauteils ist eine Aufteilung in nachfolgende Bereiche geeignet (siehe Abb. 5):

- Verglasung im ungestörten Bereich (1 D)
- Randverbund Verglasung/Rahmen (2 D)
- Verglasung/ Randverbund/ Rahmen/ Bauteilanschluss (2/3 D)

Die Energieerhaltungsgleichung für den Wärmetransport

Die einzelnen Wärmetransportvorgänge werden nachfolgend den Scheiben, den Zwischen- bzw. Hohlräumen und den Oberflächen zugeordnet. Die Energieerhaltungsgleichung für den Wärmetransport lautet:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot q + \delta_u = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (14)$$

Q = innere Energiedichte, t = Zeit,
x = Ort in x, y, z-Richtung, q = Wärmestromdichte,
 δ_u = Wärmequellen- und -senken, ρ = Dichte,
c = spezifische Wärme, T = Temperatur

Dabei stehen die Wärmetransportvorgänge im Gleichgewicht mit der Wärmespeicherung. Die Wärmestromdichte beschreibt die Änderung der thermischen Energie über die Grenzen eines Systems

bezogen auf eine bestimmte Fläche und ein bestimmtes Zeitintervall. Die Wärmestromdichte kann sich aus den einzelnen Wärmestromdichten der Wärmeleitung, der Konvektion und der Wärmeübergänge zusammensetzen:

$$q = q_\lambda + q_r + q_c \quad (2)$$

q_λ = Wärmestromdichte der Wärmeleitung, q_r = Wärmestromdichte des langwelligen Strahlungsaustausches, q_c = Wärmestromdichte der Konvektion

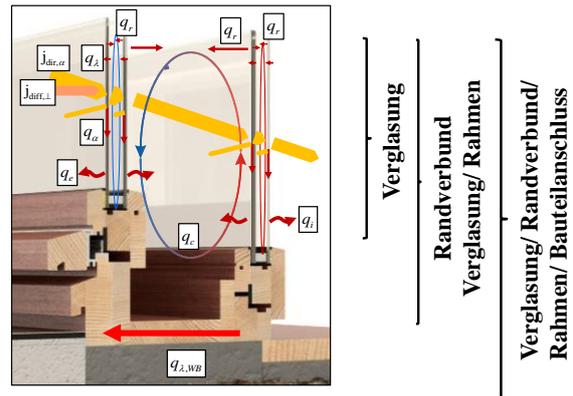


Abbildung 5: Zuordnung der Wärmetransportvorgänge und Aufteilung eines transparenten Bauteils in Bereiche [Conrad]

Innerhalb der Scheibe finden die Wärmeleitung q_λ (siehe B - Wärmeleitung) und die Absorption der Globalstrahlung q_α (siehe F Energietransport infolge der kurzwelligen Strahlung) statt. In den Zwischen- bzw. Hohlräumen erfolgt der langwellige Strahlungsaustausch zwischen den Scheiben (siehe G). Die Konvektion q_c (siehe E - Konvektion im Scheibenzwischenraum) wird als ein Wärmetransportvorgang in dem Zwischen- bzw. Hohlraum jedoch nicht als Massentransport berücksichtigt. Die Wärmestromdichten des Wärmeübergangs auf der Außenseite q_e und Innenseite q_i sind den jeweiligen Oberflächen zugeordnet.

Die Absorption der kurzwelligen Strahlung in den Scheiben q_α wird als Wärmequelle berücksichtigt:

$$\delta_u = q_\alpha \quad (3)$$

q_α = Wärmequelle der Absorption der kurzwelligen Strahlung in den Scheiben

Eine Berücksichtigung der Absorption auf den Außenoberflächen des Fensters ist bereit mit dem Programm [DELPHIN] möglich. Bei den Innenoberflächen ist eine externe Vorberechnung unter Berücksichtigung der (Eigen-) Verschattung notwendig. Nachfolgend werden die einzelnen Wärmetransportvorgänge und die Wärmespeicherung näher beschrieben.

A Speicherung

Im Vergleich zu anderen Bauteilen besitzen transparente Bauteile in Bezug auf die Wärmeübertragungsquerschnitte eine geringe Speichermasse und damit verbunden eine schnelle Änderung der Wärmetransportvorgänge und der Temperatur. Die Speicherung der Wärmeenergie (innere Energie) ist die zeitliche Änderung der Energiedichte im Volumen und daraus abgeleitet die zeitliche Änderung der Temperatur (siehe Gleichung (1)).

B Wärmeleitung

Der Wärmedurchgang bei einer hohlraumfreien Baukonstruktion setzt sich zusammen aus der Summe der Wärmeleitung in den einzelnen Schichten des Bauteils und den Wärmeübergängen an den Rändern.

C Wärmeübertragung auf der Außenseite

Der äußere Wärmeübergang findet zwischen der Oberfläche des Festkörpers Glas und des Fluids Außenluft an den Rändern statt. Die äußeren Wärmeübergangsvorgänge setzen sich aus der Konvektion und der Wärmestrahlung zusammen. Der konvektive Anteil der Wärmeübertragung ist abhängig von der Oberfläche des Glases (z. B. Verschmutzungsgrad), der Neigung, der Luftgeschwindigkeit, der Luftrichtung, der Temperatur des Fluids und der Glasoberfläche.

Der radiative Anteil der äußeren Wärmeübertragung berücksichtigt die Strahlungswechselwirkung des langwelligen Strahlungsaustausches mit der Umgebung.

D Wärmeübertragung auf der Innenseite

Die inneren Wärmeübertragungsvorgänge setzen sich ebenfalls aus der Konvektion und der Wärmestrahlung zusammen. Der konvektive Anteil der inneren Wärmeübertragung ist im Jahresmittel gegenüber der äußeren Wärmeübertragung geringer. Er wird durch den Temperaturunterschied zwischen der Oberfläche des Glases und der Raumluft verursacht. Der radiative Anteil der inneren Wärmeübertragung berücksichtigt den langwelligen Strahlungsaustausch zwischen der Oberfläche der Konstruktion und den Raumbooberflächen (vgl. [DIN EN 673]).

E Konvektion im Scheibenzwischenraum

Die Konvektion im Scheibenzwischenraum bewirkt zusätzlich einen Wärmetransport durch das Mitführen der thermischen Energie des strömenden Fluids (Luft, Edelgase: Argon, Krypton, Xenon) in einem geschlossenen Hohlraum. Die Temperatur des Fluids erhöht sich an der warmen Außen- oder Innenoberfläche und kühlt sich an der kalten Oberfläche ab. Infolge der induzierten Massedichteänderung und damit verbundenen Gravitation kommt es zum Aufsteigen des Fluids an

der warmen und zum Absinken an der kalten Oberfläche. Es bildet sich eine Konvektionswalze aus (siehe Abb. 5). Bei dieser freien (natürlichen) Konvektion erfolgen eine Wärmeaufnahme des Fluids an der warmen Seite und eine Wärmeabgabe an der kalten Seite.

Die Konvektion ist abhängig vom Fluid im Scheibenzwischenraum und dessen physikalischen Eigenschaften (Dichte, dynamische Viskosität, Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität) in Abhängigkeit von der Temperatur, der Geometrie des Hohlraumes (Höhe, Breite) und des Temperaturunterschiedes zwischen den Scheiben.

Durch eine CFD-Simulation (Multiphysik) können das Strömungsfeld und die Temperaturverteilung ermittelt werden. Für die Geometrien: schmaler Hohlraum (vertikal, horizontal, geneigt) und breiter vertikaler Hohlraum (z. B. Kastenfenster) gibt es halbempirische Beschreibungs- und vereinfachte analytische Modelle für die Berechnung des Wärmetransportes infolge der Konvektion mit einem definierten Strömungsfeld und einer dazugehörigen Temperaturverteilung (vgl. Abb. 5). Für die Berücksichtigung der Konvektion im Programm [DELPHIN] wurde ein geeignetes analytisches Modell für die freie Konvektion in geschlossenen Hohlräumen für transparente Bauteile für typische Anwendungsfälle untersucht. Zum Teil sind deren Anwendungsgrenzen nur unzureichend dokumentiert bzw. wurden diese Modelle nicht primär für die Konvektion bei transparenten Bauteilen entwickelt. Die analytischen Konvektionsmodelle [DIN EN 673], [ISO 15 099], [Marek u. Nitsche] (Elsherbiny, Raithby und Hollands), [VDI-Wärmeatlas] (Modell Klan und Thess) und [Häupl] wurden mittels einer Parameterstudie bei einer 2-Scheiben-Verbundverglasung (vertikal, horizontal, 30°, 45° und 60° geneigt) und Kastenfenster für den bautypischen Temperaturbereich von -25 °C bis 80 °C untersucht. Die Untersuchungen betrachteten eine maximale Temperaturdifferenz zwischen den Scheiben von 60 Kelvin. Bei der Variation des Scheibenabstandes wurden die Randbedingungen der [DIN EN 673] verwendet. Bei den analytischen Berechnungen werden die Materialkennwerte des Edelgases Krypton mit 90 % Füllgrad auf $T_m=10$ °C bezogen. Das Edelgas Krypton wird bei Wärmeschutzverglasungen verwendet, welche schmalere Verglasungsgesamtdicken und somit schmale Fensterprofile mit historischen Ansichtsbreiten bei denkmalgeschützten Gebäuden ermöglichen. Die Stärke der Glasscheiben beträgt 4 mm. Der Emissionsgrad der Wärmeschutzverglasung beträgt $\varepsilon=0,03$ und der K-GlassTM-Beschichtung $\varepsilon=0,15$. Die K-GlassTM-Beschichtung besitzt dauerhaft eine hohe chemische und mechanische Widerstandsfähigkeit sowie eine hohe Kratzfestigkeit. Somit ist diese für die Anwendung in Kastenfenstern prädestiniert. Zusätzlich wurden die Neigung der Verglasung, die Temperaturunterschiede

im Scheibenzwischenraum (SZR) und die Breite des Scheibenzwischenraumes variiert. Beispielpflicht wird die Untersuchung für die schmale vertikale ebene Schicht erörtert.

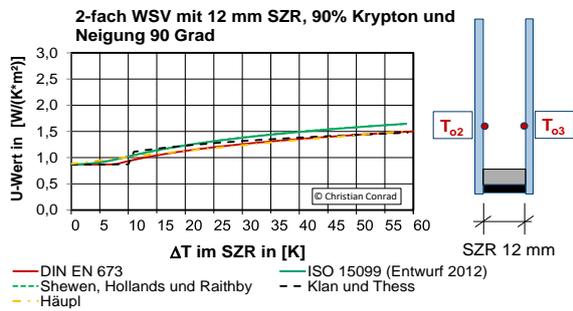


Abbildung 6: Vergleich der U-Wert-Berechnungsmodelle bei der Variation des Temperaturunterschiedes im SZR [Conrad]

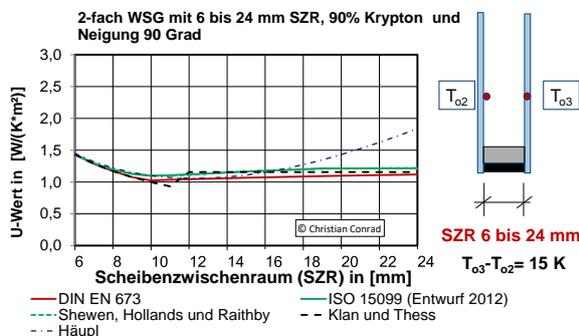


Abbildung 7: Vergleich der U-Wert-Berechnungsmodelle bei der Variation des Scheibenzwischenraumes [Conrad]

Bei einer vertikal eingebauten WSV liegen die ermittelten U-Werte der einzelnen Konvektionsmodelle dicht beieinander. Das Konvektionsmodell nach [Häupl] liefert ab 18 mm Scheibenzwischenraum (SZR) höhere Werte (siehe Abb. 6 und 7). Bis auf das Modell von Robison und Powlitch aus dem Jahre 1954 aus der [DIN EN 673] verwenden alle anderen Konvektionsmodellzusammenstellungen verschiedene zum Teil sehr komplexe Formeln für verschiedene Einbautagen, SZR und Neigungen. Ein Genauigkeitserfolg bei der Ug-Wert Ermittlung gegenüber der DIN EN 673 konnte bei dieser Parameterstudie bei der Verwendung der komplexen Konvektionsmodellzusammenstellung und einer CFD-Simulation [Kuhne] nicht festgestellt werden.

Das Modell von Robison und Powlitch [DIN EN 673] wurde für die weitere Bearbeitung sowie für die Implementierung in das Programm [DELPHIN] ausgewählt. Es liefert mit einer allgemeingültigen Formel für alle bautypischen Geometrien von Verglasungen plausible Ergebnisse in der Parameterstudie, welche nachfolgend zu einer guten Übereinstimmung für Messung und Simulation

fürten. Die Konvektion wird im Programm [DELPHIN] in der korrigierten Wärmeleitfähigkeit λ_{Nu} des Fluids im Scheibenzwischenraum mittels der Nusselt-Zahl berücksichtigt.

$$\lambda_{Nu} = Nu \cdot \lambda \tag{4}$$

Dabei wird mittels dieser analytischen Berechnung für jeden Berechnungsschritt die Wärmeleitfähigkeit bestimmt. Die Nusselt-Zahl ergibt sich wie folgt:

$$Nu = A \cdot (Gr \cdot Pr)^n \tag{5}$$

Nu= Nusselt-Zahl, A, n= Korrekturfaktor, Gr = Grashof-Zahl, Pr= Prandtl-Zahl

Tabelle 1: Korrekturfaktoren A und n

Lage	0°	45°	90°
A	0,16	0,10	0,035
n	0,28	0,31	0,38

$$Gr = \frac{g \cdot s^3 \cdot \Delta T \cdot \rho^2}{T_m \cdot \mu^2} \tag{6}$$

g= Erdbeschleunigung, s= Breite des Zwischenraumes, ΔT= Temperaturdifferenz zwischen den Glasflächen, ρ= Dichte des Gases, T_m= mittlere Temperatur, μ= dynamische Viskosität

$$Pr = \frac{\mu \cdot c}{\lambda} \tag{7}$$

λ=Wärmeleitfähigkeit des Gases, c= spezifische Wärme

F Energietransport infolge der Globalstrahlung

Das kurzwellige Sonnenlicht wird innerhalb der Glasscheibe absorbiert. Ein weiterer Anteil wird an der Glasscheibenoberfläche reflektiert. Der Großteil der Sonnenstrahlung wird durch die Glasscheibe transmittiert (durchgelassen) (siehe Abb. 8).

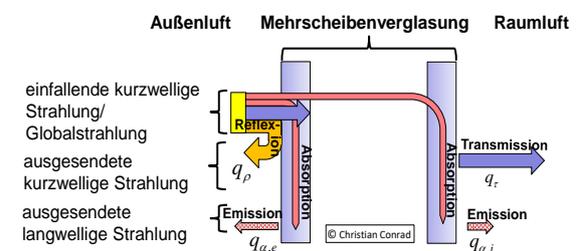


Abbildung 8: Energiebilanz der Strahlung [Conrad]

Die Absorption bewirkt unter anderem eine Erhöhung der Oberflächentemperatur und damit verbundene eine höhere langwellige Emission nach innen und außen. Die Absorption wird in dem Programm DELPHIN als Feldbedingung Energiequelle berücksichtigt. Diese Energiequelle wird extern, ggf.

unter Berücksichtigung der äußeren Verschattung durch Gebäude, Laubung usw., vorberechnet. Dazu wird der neigungsabhängige Absorptionsgrad mit dem Programm [Window] ermittelt (siehe Abb. 9). Für jeden Zeitschritt wurden der Einfallswinkel und der dazugehörige Absorptionsgrad in Abhängigkeit der Lage und Neigung bestimmt:

$$q_{\alpha,n} = \frac{j_{\text{diff},\perp} \cdot \alpha_n(0^\circ) + j_{\text{dir},\alpha} \cdot \alpha_n(\gamma)}{d_n} \quad (8)$$

$q_{\alpha,n}$ = Wärmequelle der Absorption der kurzwelligigen Strahlung in der n-ten Scheibe, $j_{\text{diff},\perp}$ = diffuse Normalstrahlung \perp zur Verglasung, $j_{\text{dir},\alpha}$ = Direktnormalstrahlung, $\alpha_n(\gamma)$ = Absorptionsgrad in Abhängigkeit des Einfallswinkels, γ = Einfallswinkel, d_n = Dicke der Glasscheibe

In der Praxis liegt in der Regel nur ein Absorptionsgrad senkrecht zur Scheibenebene aus dem Datenblatt des Herstellers vor. In diesem Fall kann der Absorptionsgrad der Scheibe bis zu einem Einfallswinkel von 80° verwendet und im Bereich zwischen 80° und 90° ($\alpha=0$) linear interpoliert werden.

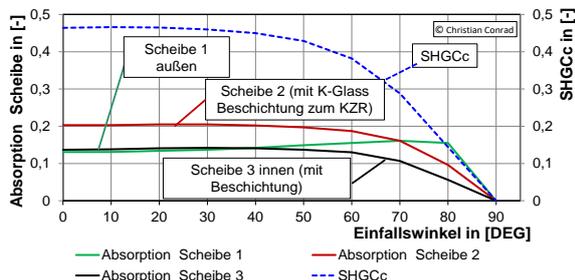


Abbildung 9: Kastenfenster mit WSV und K-Glass innen (V3), Absorption der kurzwelligigen Strahlung und Strahlungstransmission (SHGCc) in Abhängigkeit des Einfallswinkels [Conrad]

G langwelliger Strahlungsaustausch zwischen den Scheiben

Der langwellige Strahlungsaustausch zwischen den Scheiben in den Zwischen- bzw. Hohlräumen wird als Wärmequelle und -senke an den jeweiligen Scheibenoberflächen im Programm [DELPHIN] unter Berücksichtigung der Scheibenoberflächentemperatur und des Emissionsvermögens berücksichtigt. Der Energietransport zwischen planparallelen Flächen enthält neben der Eigenemission einer Oberfläche auch die rückreflektierte Strahlung.

$$q_{r,k} = \sigma \cdot \frac{T_i^4 - T_e^4}{\frac{1}{\epsilon_i} + \frac{1}{\epsilon_e} - 1} \quad (9)$$

σ = Stefan-Boltzmann-Konstante, T = Temperatur der Oberfläche, ϵ = effektives Emissionsvermögen

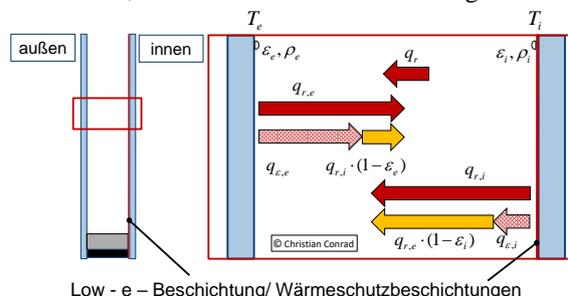


Abbildung 10: Wärmestrombilanz zwischen zwei planparallelen Flächen [Conrad]

VERGLEICH ZWISCHEN MESSUNG UND DER SIMULATION

In die Simulation gehen die messtechnisch ermittelten Eingangswerte der Oberflächentemperatur auf der Raumseite (Position 8) und die Außenlufttemperatur sowie als Feldbedingung die Absorption der Globalstrahlung senkrecht zur Fassadenebene für alle 4 Scheiben ein. Die gemittelten Absorptionsgrade wurden unter Berücksichtigung der Mehrfachreflexion des gesamten Glaspaketes für jede Scheibe mit dem Programm [Window] und anhand von Herstellerangaben ermittelt (vgl. Abb. 9). Die gemessene Scheibenoberflächentemperatur auf Position 4 wird mit der simulierten Scheibenoberflächentemperatur des aufgestellten Simulationsmodells verglichen. Beispielhaft wird die Messstrecke Kastenfenster, 1. DG Süd im Messzeitraum Juli 2017 betrachtet, da die Temperaturen in der sommerlichen Hitzeperiode wesentlich höher als auf der Nordseite sind. Es gibt eine gute Übereinstimmung von Messung und Simulation bei Temperaturen bis zu 25°C . Darüber hinaus gibt es kurzzeitige größere Abweichungen bei Temperaturen über 50°C .

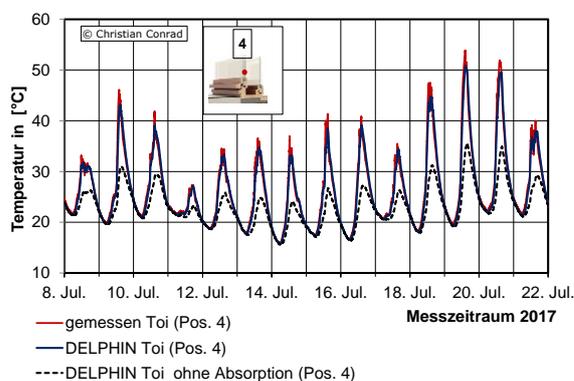


Abbildung 11: gemessene und simulierte Scheibenoberflächentemperaturen mit und ohne der kurzwelligigen Absorption [Conrad]

Zur Veranschaulichung wurde eine Simulation ohne Berücksichtigung der kurzwelligen Absorption durchgeführt. Die Temperaturen an der Oberfläche der äußeren Wärmeschutzverglasung im Kastenzwischenraum (Position 4) sind wesentlich geringer

(siehe Abb. 11). Die Messungen am realen Gebäude und die Simulationen der Kastenfenster haben gezeigt, dass bei der Bauteil- und Gebäudesimulation die Berücksichtigung der Absorption der kurzwelligen Strahlung und die daraufhin veränderten freien Konvektionen und der langwellige Strahlungsaustausch in den geschlossenen Hohlräumen nicht vernachlässigt werden können.

ENERGETISCHE ERTÜCHTIGUNG VON BESTANDSFENSTERN

Als nächster Schritt wurden ausgehend von einem Bestandskastenfenster Beispiele von umgesetzten energetischen Fenstersanierungen durch den Austausch der Verglasungen sowie bei Einfachfenstern durch Einsatz einer neuen Fensterebene untersucht:

- Variante 0: Bestandskastenfenster
- Variante 1: Bestandskastenfenster mit innerer Scheibe mit K-Glass™-Beschichtung
- Variante 2: Bestandskastenfenster mit schmaler WSV mit K-Glass™-Beschichtung außen
- Variante 3: Kastenfenster mit schmaler WSV und K-Glass™-Beschichtung innen
- Variante 4: Doppelfenster mit neuer WSV vor Einfachfenster mit alter WSV

Tabelle 2: lichttechnische Kennwerte Variante 1-4

V	0	1	2	3	4
Absorptionsgrad je Scheibe (1 ... außen)					
α_1	0,067	0,069	0,190	0,144	0,166
α_2	0,048	0,142	0,081	0,187	0,121
α_3			0,012	0,128	0,038
α_4					0,047
Position der jeweiligen Emissionsgrade					
$\epsilon = 0,03$			2	5	3, 7
$\epsilon = 0,15$		3	4	3	
$\epsilon = 0,84$	1-4	1,2,4	1, 3, 5, 6	1, 2, 4, 6	1, 2, 4-6, 8
Hohlraum in [mm] Ar...Argon, Kr...Krypton					
KSZ	125	125	80	125	100
SZR			6 Kr	16 Ar	16/ 12 Ar/ Kr

Für alle thermischen Simulationen wurden die Temperatur sowie die direkte und diffuse Strahlung

des Testreferenzjahres (TRY) 2010 DE 09 (Repräsentanzstation Chemnitz) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet. Für die Variante 3 wird beispielhaft für eine Südfassade die simulierte Temperaturverteilung in Abb. 12 gezeigt. Der Einfluss der Absorption der kurzwelligen Strahlung in den Scheiben und die damit einhergehende Temperaturverteilung beeinflusst die Konvektion und den langwelligen Strahlungsaustausch in der Wärmeschutzverglasung und dem Kastenzwischenraum im Tages- und Jahresverlauf maßgeblich.

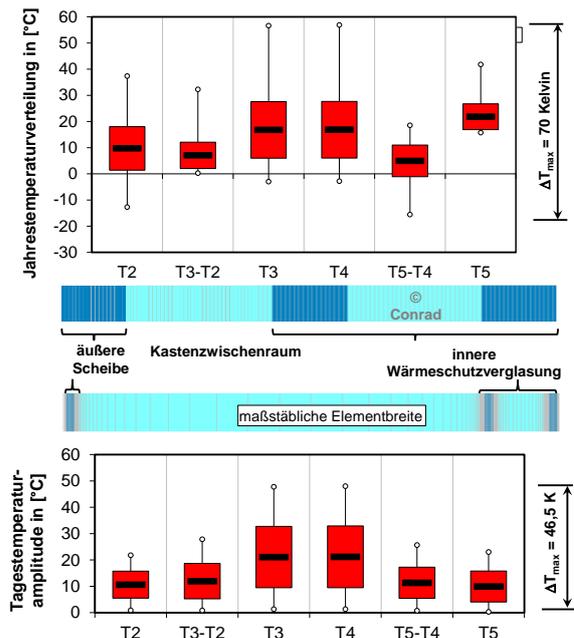


Abbildung 12: simulierte Jahrestemperaturverteilung und Tagestemperaturamplitude der V3 [Conrad]

Die Aufheizung im Kastenzwischenraum ist mit max. 58 °C wesentlich höher als bei dem Bestandskastenfenster. Die maximale Jahrestemperaturamplitude liegt mit ca. 70 Kelvin um 30 Kelvin höher als bei dem Bestandskastenfenster. Die für die Beurteilung der thermischen Spannungen maximale Tagesschwankung beträgt in der Scheibe 2 mit der K-Glass™-Beschichtung ca. 46,5 Kelvin (siehe Abb. 12 und Abb. 14).

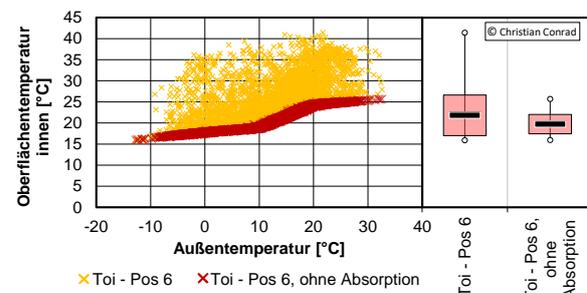


Abbildung 13: simulierte Innenoberflächentemperatur [Conrad]

Die maximale Oberflächentemperatur unter Berücksichtigung der Absorption der kurzwelligeren Strahlung liegt bei Außentemperaturen um die 20 °C bei über 40 °C. Auch innerhalb der Heizperiode, bei Außentemperaturen unter 12 °C, liegen je nach Einstrahlung die Werte ebenfalls über 35 °C. Die Oberflächentemperaturen unter Verwendung des statisch ermittelten U-Wertes nach [DIN EN 673] bzw. bei Simulation ohne den Ansatz der Absorption der kurzwelligeren Strahlung führen bei diesem Verglasungsaufbau zu einer sehr großen Abweichung der Oberflächentemperaturen (siehe Abb. 13.).

Die erreichten energetischen Verbesserungen zeigen, dass Bestandsfenster durch einen Austausch der Verglasung bzw. durch Anordnen einer neuen Fensterebene zu energetisch hocheffizienten Fenstern nachgerüstet werden können und ein Großteil der Originalsubstanz erhalten werden kann. Mit steigender Energieeffizienz der Verglasung steigen die Temperaturdifferenzen im Tages- und Jahresverlauf in den jeweiligen Verglasungsaufbauten an. Dies muss erkannt und konstruktive Maßnahmen umgesetzt werden, um Schäden infolge thermischer Spannungen zu vermeiden (siehe Abb. 14).

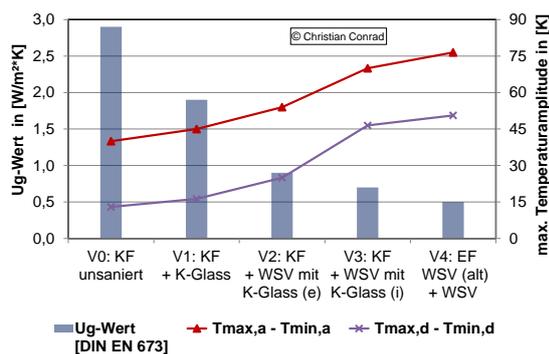


Abbildung 14: Beispiele für die energetische Ertüchtigung von Fenstern im Bestand

AUSBLICK

Der Algorithmus zur thermischen Simulation von transparenten Bauteilen wurde mit der hygrothermischen Simulation im Programm [DELPHIN] angewendet. Die Abb. 15 zeigt beispielhaft das Temperaturfeld mit dem Temperaturmaximum in der 2. Scheibe und das Feld der relativen Feuchtigkeit einer hygrothermischen Simulation des Laibungsanschlusses eines Kastenfensters (Variante 3). Zurzeit wird eine Arbeitshilfe für die sonst aufwendige Vorberechnung der Absorption in Scheiben erarbeitet. Dabei sollen z. B. die Verschattungs- und Absorptionseffekte innerhalb eines Kastenfensters berücksichtigt werden. In Zusammenhang mit der hygrothermischen Simulation mit einer zeitlich und räumlich detaillierteren Auflösung müssen ggf. Kriterien zur Schadens- und Risikobewertung der einzelnen Bestandteile des Fensters (Verglasung,

Randverbund, Rahmen, Beschichtungssystem usw.) und der Bauteilanschlüsse weiterentwickelt werden.

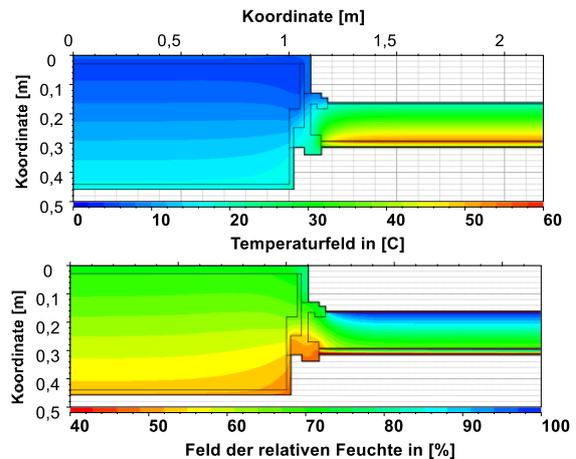


Abbildung 15: hygrothermische Simulation des Laibungsanschlusses des Kastenfensters (V3), Temperatur- und Feuchtfeld am 15. Feb. 12 Uhr

LITERATUR/ NORMEN/ PROGRAMME

- Conrad, C.: Implementierung und Validierung eines Algorithmus zur thermischen Simulation von transparenten Bauteilen für die energetische Ertüchtigung von Fenstern im Bestand; Dresden; 2019
- Marek, R., Nitsche, K.: Praxis der Wärmeübertragung; Deggendorf; 2012
- Häupl, P.: Bauphysik - Klima Wärme Feuchte Schall, Grundlagen, Anwendungen, Beispiele; Berlin; 2008
- Kuhne, M.: Modellierung des Energietransports durch Verglasungen; Weimar; 1997
- VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen: VDI-Wärmeatlas; 11. Auflage; Düsseldorf; 2013
- DIN EN 410: Glas im Bauwesen - Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen; Berlin; 2011
- DIN EN 673: Glas im Bauwesen – Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) – Berechnungsverfahren; Berlin; 2011
- DIN EN ISO 10 211: Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen; Berlin; 2010
- ISO 15 099 - 2012 (Entwurf): Thermal Performance of Windows, Doors and Shading Devices - Detailed Calculations; Geneva (Schweiz); 2012
- [DELPHIN] www.bauklimatik-dresden.de/delphin/
- [Window] <https://windows.lbl.gov/software/window>

ENTWICKLUNG EINES ONLINE-SIMULATIONSWERKZEUGS ZUR INTERAKTIVEN NUTZUNG VON MODELICA-BIBLIOTHEKEN ZUR ENERGETISCHEN GEBÄUDESIMULATION FÜR DEN EINSATZ IN DER LEHRE

C. Nytsch-Geusen¹, W. Kaul¹, D. Kreulitsch¹ und J. Rädler¹

¹Institut für Architektur und Städtebau, UdK Berlin, Berlin, Deutschland

E-Mail: nytsch@udk-berlin.de

KURZFASSUNG

Für den Einsatz von Modelica-Modellbibliotheken in der Lehre wurde ein Server-basierter Ansatz auf Basis von Jupyter-Notebooks und des Open Source-Simulationswerkzeuges OpenModelica entwickelt, welcher eine einfache Nutzung didaktisch aufbereiteter Modelica-Modelle im Web-Browser gestattet. Hierbei wird der Modelica-Quellcode hinter der Weboberfläche für den Nutzer verborgen. Das Webinterface ermöglicht die Durchführung und Auswertung des Simulationsexperiments und ist mit didaktisch wichtigen Informationen angereichert, die sich auf die jeweilige Aufgabenstellung aus der Bauphysik oder der Gebäudetechnik beziehen. Die Nutzer können dann in einfacher Weise Simulationsmodelle auswählen und deren Parameter interaktiv in einem sinnvoll begrenzten Rahmen variieren, um so das Modellverhalten zu studieren.

Der Beitrag beschreibt zum einen den didaktischen Ansatz und zum anderen seine softwaretechnische Umsetzung. Mit Hilfe von zwei Beispielen aus den Bereichen der Bauphysik und der Gebäudetechnik auf Basis der Modelica-Bibliothek BuildingSystems wird die Anwendung des Online-Simulationswerkzeugs demonstriert.

ABSTRACT

For the use of Modelica model libraries in teaching, a server-based approach based on Jupyter notebooks and the open source simulation tool OpenModelica was developed, which allows an easy use of didactically prepared Modelica models in the web browser. The Modelica source code is hidden behind the web interface for the user. The web interface enables the simulation experiment to be carried out and evaluated and is enriched with didactically important information relating to the respective task from building physics or building technology. The users can easily select simulation models and interactively vary their parameters within a reasonably limited range in order to study the model behavior.

The article describes on the one hand the didactic approach and on the other hand the software implementation. Using two examples from the fields of building physics and building technology based on the Modelica library BuildingSystems, the use of the online simulation tool is demonstrated.

EINLEITUNG

Ein Blick in die Literatur zeigt, dass für verschiedene Gebiete der bauphysikalischen und energetischen Gebäudeplanung Online-Werkzeuge entwickelt wurden, die entweder gezielt für den Einsatz in der Lehre konzipiert wurden oder aber hierfür genutzt werden können. So wurden beispielsweise innerhalb des Forschungsverbundprojekts „multimediales Lernnetz Bauphysik“ für die bauphysikalische Lehre an Hochschulen und Universitäten Wissens-, Übungs- und Berechnungsmodule für die Bereiche Wärme, Feuchte und Schall entwickelt und praktisch erprobt (siehe Abbildung 1).

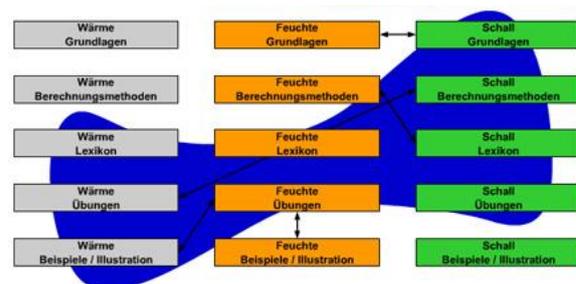


Abbildung 1: Berechnungsmodule des „Multimedialen Lernnetzes Bauphysik“ (Quelle: Bauhaus-Universität Weimar)

Alle Module des „Lernnetzes Bauphysik“ verfügen über ein einheitliches Interface, welches auf den Ebenen Bauelement, Einzelraum oder Gebäude von den Studierenden über ein Webportal ergänzend zu der Präsenzlehre im Selbststudium genutzt werden kann (Mehra et al. 2004).

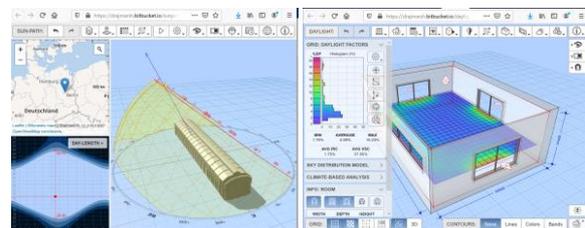


Abbildung 2: Web-Applikationen zur energetischen Gebäudeanalyse (Quelle: Marsh 2020)

In Abbildung 2 sind zwei der Web-Applikationen von Andrew Marsh dargestellt, welche für die energetische Analyse von Gebäuden intuitiv in leicht verständlicher Weise in der Lehre angewandt werden können. Die linke Abbildung zeigt ein Tool zur

Verschattungsanalyse von Baukörpern, die rechte Abbildung ein weiteres Tool zur Tageslichtanalyse von Innenräumen. In den Webtools von Marsh können beispielsweise der Gebäudestandort und die Gebäudeorientierung, der betrachtete Zeitpunkt im Jahr oder die Dimensionen des Raums und von transparenten Bauteilen interaktiv im Webbrowser durch den Nutzer verändert werden, worauf das Berechnungsergebnis unmittelbar aktualisiert wird. Die Berechnungsalgorithmen werden bei diesen Programmen als JavaScript-Bibliothek vom Server auf den lokalen Rechner des Nutzers geladen und dort ausgeführt.

Im Bereich der Simulation von Anlagen zur Energieversorgung von Gebäuden sind die Online-Varianten der Simulationsprogramme PVSol (PVSol Online 2020) und TSol (TSol Online 2020) sowie Polysun (Polysun Online 2020) erwähnenswert. Abbildung 3 zeigt beispielhaft das Webinterface von Polysun, bei dem das gewählte Anlagenschema zunächst visualisiert wird (Abbildung 3 links) und dessen Anlagenkomponenten individuell über Dialoge und Auswahlmenüs vom Nutzer parametrisiert werden können (Abbildung 3 rechts). Die Durchführung der Simulationsrechnung wird in diesem Fall auf dem Server des Programmherstellers durchgeführt und danach die Ergebnisse dem Nutzer über ein pdf-File per Email zur Verfügung gestellt.

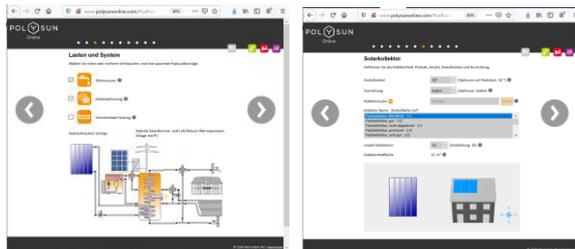


Abbildung 3: Online-Variante von Polysun

Das in diesem Beitrag beschriebene Online-Simulationswerkzeug für den Einsatz in der Lehre verfolgt einen etwas anderen Ansatz:

In einer Lehrveranstaltung soll eine gemeinsame Aufgabe oder ein Aufgabenkatalog von den Studierenden bearbeitet werden. Das Online-Simulationswerkzeug stellt dem Endnutzer die notwendigen Simulationsmodelle über einen Server zentral bereit und erlaubt eine individuelle Bearbeitung im Webbrowser. Damit kann die Reihenfolge der zu bearbeitenden Einzelaufgaben oder auch die geforderte Modellparametrierung für einzelne Kursteilnehmer von der Aufgabenstellung her unterschiedlich festgelegt werden.

Als Grundlage der Modellbildung wird die Modellierungssprache Modelica (Modelica 2020) genutzt, welche mittlerweile weltweit für die energetische Gebäudesimulation in vielen unterschiedlichen Teilbereichen von der Bauteilsimulation, der Raum- und Gebäudesimulation bis zur Quartierssimulation verwendet wird, was im internationalen Verbundprojekt IBPSA Project 1 dokumentiert wird (Wetter et al. 2019, IBPSA Project 1, 2020).

Die Bearbeitung von Modelica-Modellen und ihre Ausführung im Simulationsexperiment in einem Webbrowser wurde über die Webapplikation OMWebbook demonstriert (OMWebbook, 2020). Der Modelica-Quellcode wird hier direkt im Webbrowser editiert, das Simulationsexperiment auf einem zentralen Server auf Basis von OpenModelica ausgeführt und die Ergebnisse dem Endnutzer im gleichen Webbrowser angezeigt (vgl. Abbildung 4).



Abbildung 4: Simulation von Modelica-Modellen mit OMWebbook

Die für die energetische Gebäude- und Anlagensimulation konzipierten Modelica-Modellbibliotheken Buildings, AixLib, IDEAS und BuildingSystems sind durch die gemeinsam verwendete Modelica IPBSA-Bibliothek (<https://github.com/ibpsa/modelica-ibpsa>) sehr gut untereinander kombinierbar und durch den objekt- und gleichungsbasierten Ansatz von Modelica zudem leicht erweiterbar.

Leider sind diese Modell-Bibliotheken für technisch weniger versierte Nutzer, wie z.B. Studierende im Grundstudium, durch ihre Komplexität nicht immer leicht verständlich und anwendbar. Aus diesem Grund wird der Quellcode der Modelica-Modelle im vorliegenden Ansatz dem Endnutzer zunächst vollständig verborgen. Er kann lediglich zwischen den

für die Bearbeitung der Aufgabenstellung vorbereiteten Modelica-Systemmodellen auswählen und diese dann individuell parametrisieren.

SOFTWARETECHNISCHE UMSETZUNG

Als Grundlage des Webinterfaces für den Endnutzer wird die web-basierte interaktive Jupyter-Notebook Umgebung (Jupyter 2020) verwendet, mit der Jupyter-Notebook-Dokumente mit der Dateiendung *.ipynb erstellt werden können. Ein Jupyter-Notebook-Dokument wird als ein JSON-File gespeichert, welches eine Liste aus Eingabe- und Ausgabezellen in einem Webbrowser repräsentiert, die jeweils Programmcode, Textinformationen oder grafische Plots enthalten können. Hierbei werden die einzelnen Zellen strikt der Reihenfolge nach abgearbeitet, was der Nutzer berücksichtigen muss (siehe Abbildung 5).

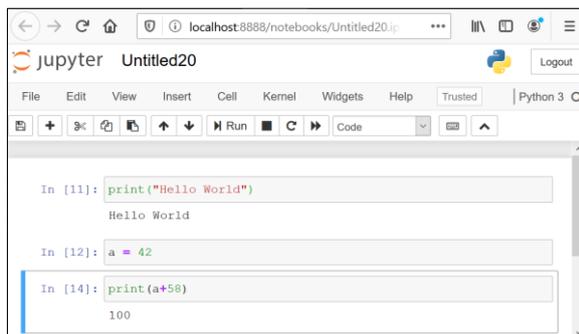


Abbildung 5: Ausgeführte Zelle in einem Jupyter-Notebook für die Sprache Python

Jupyter-Notebooks unterstützen mehr als 40 Programmiersprachen, u.a. Python, R, Julia und Scala. Im vorliegenden Fall wird die Programmiersprache Python verwendet, da diese einerseits die grundlegende Sprache zur Darstellung und Anpassung von Jupyter-Notebooks verkörpert, andererseits die meisten Modelica-Simulationstools wie Dymola, OpenModelica oder JModelica über eine Python-Schnittstelle angesteuert werden können. Über die Python-Schnittstellen kann der gesamte Workflow von der Übersetzung und Parametrisierung des Modelica-Simulationsmodells bis hin zur Berechnung und Auswertung des Simulationsexperiments kontrolliert werden.

Die Standardvariante von Jupyter-Notebook erlaubt nur die Ausführung eines Notebooks von einem Anwender auf einem lokalen oder entfernten Rechner im Intra- oder Internet. Für den Fall das mehrere Nutzer gleichzeitig jeweils einen eigene Prozess, z.B. in Form von Simulationsläufen über das Jupyter-Notebook-Webinterface starten möchten, wird eine Server-Client-Lösung benötigt. Für diesen Anwendungsfall wurde vom Jupyter-Projekt die Server-Variante JupyterHub (JupyterHub 2020, siehe Softwarearchitektur in Abbildung 6) entwickelt. Die individuellen Inhalte und Bearbeitungsstände der einzelnen Nutzer werden bei JupyterHub in einer Datenbank gespeichert, wodurch eine Vielzahl von Nutzern gleichzeitig auf den Simulationsrechnern zugreifen kann.

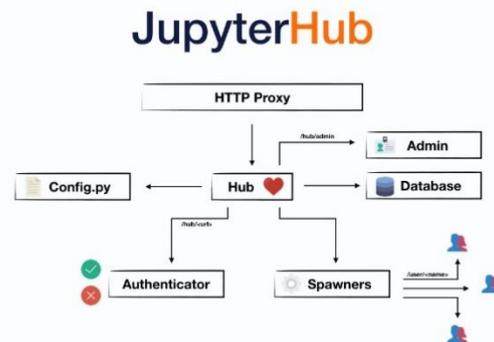


Abbildung 6: Softwarearchitektur von JupyterHub

Als Simulationsrechnern kommt das Open Source Modelica-Werkzeug OpenModelica (OpenModelica 2020) in der Version 1.15 zur Anwendung, welches über seine Python-Schnittstelle (OMPpython) mit der Jupyter-Webumgebung kommuniziert (Abbildung 7).

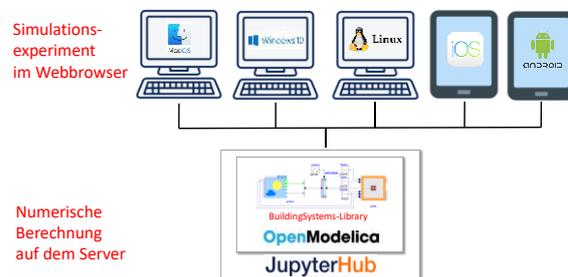


Abbildung 7: Online-Simulationswerkzeug auf Basis von JupyterHub und OpenModelica

Im vorliegenden Fall wird eine spezielle Variante von JupyterHub, „The Littlest JupyterHub“ (The Littlest JupyterHub 2020) genutzt, welche eine besonders einfache Konfiguration und Installation unterstützt und für kleinere Anwendungen von bis zu 100 Clients von den Entwicklern empfohlen wird.

ANWENDUNGSBEISPIELE

An Hand von zwei Anwendungsbeispielen, der Simulation des thermischen Verhaltens eines Wärmedämmverbundsystems sowie eines solarthermischen Anlagensystems zur Warmwasserbereitung, soll der Gebrauch und das Nutzerinterface des Online-Simulationswerkzeuges demonstriert werden.

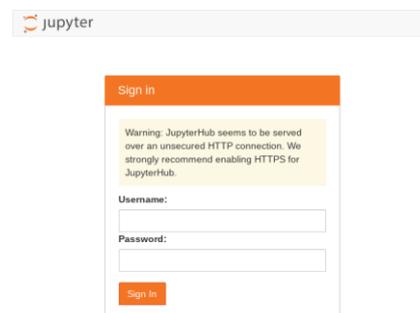


Abbildung 8: Anmeldefenster von JupyterHub

Nach Eingabe der URL erscheint das Anmeldefenster des Online-Simulationswerkzeuges, in welchem der Anwender sich zunächst mit Nutzernamen und

Passwort einloggt (siehe Abbildung 8). Danach kann er im Web-Browser eines der angebotenen Simulationsaufgaben über eine Startseite öffnen, wobei zwischen den Sprachversionen Deutsch oder Englisch gewählt werden kann (vgl. Abbildung 9).

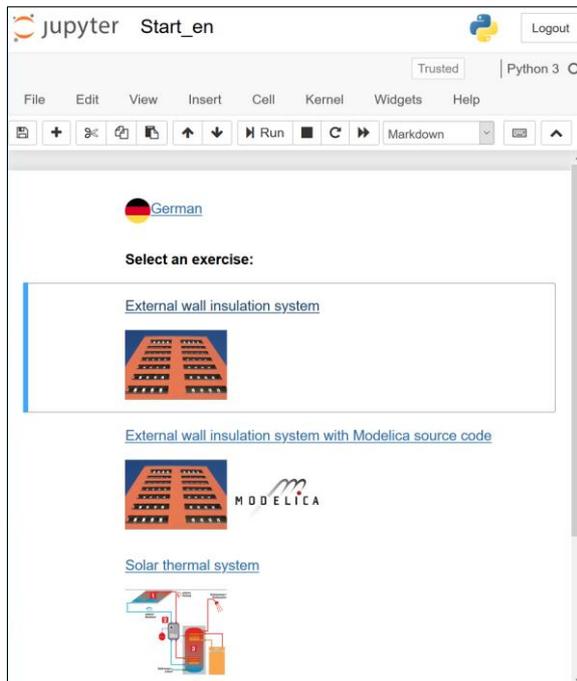


Abbildung 9: Aufgabenauswahl in der Jupyter-Notebook-Umgebung

Wärmedämmverbundsystem

In diesem Anwendungsbeispiel wird zunächst der baukonstruktive Aufbau und die Funktionsweise eines Wärmedämmverbundsystems (WDVS) erläutert (Notebook Wall_en.ipynb). Hierzu wird eine didaktische passende Kombination aus beschreibenden Text und anschaulich ergänzenden Fotos und Prinzipskizzen verwendet (vgl. Abbildung 10). Hierfür können beliebige Inhalte auf Basis der vereinfachten Auszeichnungssprache Markdown (Markdown 2020), aber auch HTML-Elemente oder mathematische Formeln über die LaTeX-Formatierung dargestellt werden, wie sie z.B. bei der Beschreibung des physikalischen Modells in Abbildung 11 verwendet werden.

Um das dynamische Verhalten dieser mehrschichtigen opaken Baukonstruktion in einem Modell abbilden und im Simulationsexperiment analysieren zu können, kommt ein Modelica-Simulationsmodell aus der BuildingSystems-Bibliothek (Nytsch-Geusen et al. 2016) zur Anwendung. Hierin ist ein Wandmodell mit drei Schichten aus unterschiedlichen Material (Ziegel, Dämmstoff, Putz) mit einem Umgebungsmodell und einem Zonenmodell verkoppelt, um die thermischen Randbedingungen auf der Wandaußen- und Innenseite differenziert berücksichtigen zu können (siehe Abbildung 12).

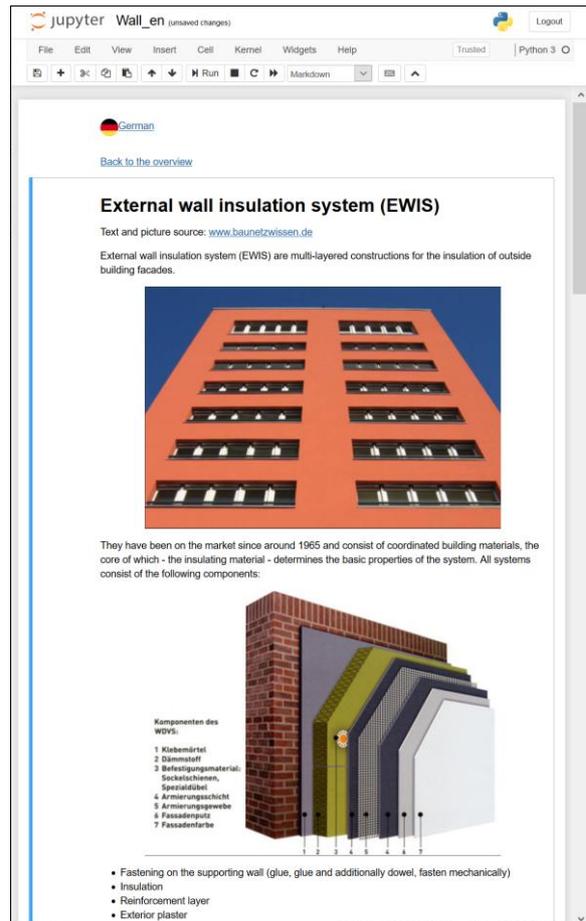


Abbildung 10: Beschreibung des Anwendungsbeispiels Wärmedämmverbundsystem

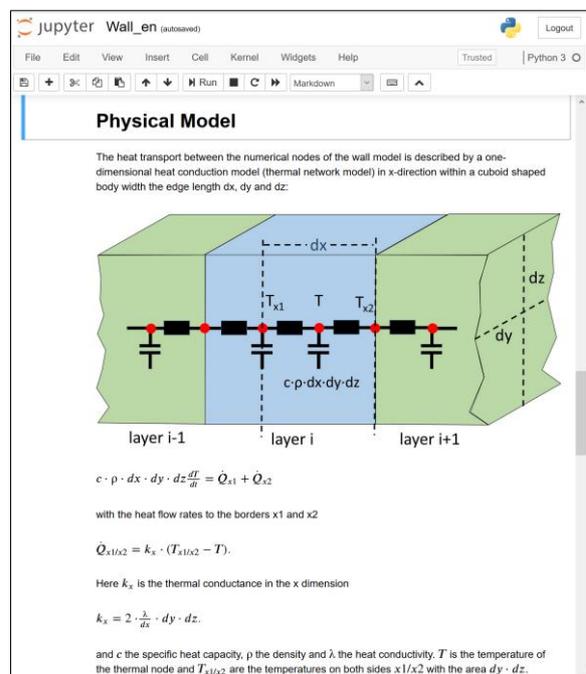


Abbildung 11: Beschreibung des physikalischen Modells, welches dem Anwendungsbeispiel Wärmedämmverbundsystem zu Grunde liegt

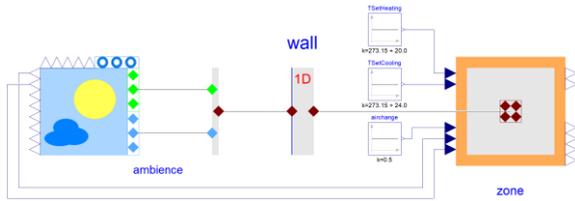


Abbildung 12: Modelica-Modell der WDVS-Fassade mit ihren klimatischen Randbedingungen

Zur Vereinfachung des Simulationsexperiments wird dieses Simulationsmodell im Jupyter-Notebook gegenüber dem Anwender nahezu vollständig verborgen.

Es können nur noch wenige Simulationsparameter in einem festgelegten Bereich (z.B. für die Ziegelschicht zwischen 12 cm bis 72 cm) und einer vorgegebenen Abstufung (12 cm Ziegelbreite) über Schieberegler angepasst werden, wodurch eine nicht sinnvolle Parameterisierung (z.B. negative oder unplausible dünne Werte für eine Ziegelschicht) ausgeschlossen werden kann (vgl. Abbildung 13).

Neben den Schichtdicken der Wandkonstruktion können in diesem Beispiel folgende Parameter verändert werden:

- **Anzahl der numerischen Knoten pro Wand-schicht:** Für die beiden Konstruktionsschichten „Ziegel“ und „Dämmung“ des WDVS kann die Anzahl der numerischen Knoten zwischen 1 und 10 variiert werden, um den Einfluss der Modelldiskretisierung auf das Rechenergebnis zu analysieren.
- **Ausrichtung der Wand:** Durch Festlegung des Azimutwinkels und des Neigungswinkels der Wand verändert sich entsprechend dem gewählten Standort die direkte Sonneneinstrahlung auf die Fassadenoberfläche.
- **Thermische Randbedingungen des Wandmodells:** Hier kann zwischen verschiedenen Klimastandorten (Berlin oder San Francisco) oder alternativ zwischen stationären Randbedingungen für den winterlichen Heizfall oder den sommerlichen Kühlfall gewählt werden. Wird einer der Klimastandorte gewählt, wirken sowohl die Außenluft- und Strahlungstemperatur des Himmels, die solare Einstrahlung als die Windgeschwindigkeit als Randbedingungen auf das Wandmodell. Im Fall von stationären Randbedingungen wird die solare Einstrahlung und die Windgeschwindigkeit zu null gesetzt und für die Außenlufttemperatur sowie die Strahlungstemperatur des Himmels werden der gleiche konstante Wert verwendet.
- **Start- und Endzeit des Simulationsexperiments:** Hierdurch kann ein sehr kurzer Zeitraum für das Simulationsexperiment über wenige Stunden bis zu einem vollständigen Jahr festgelegt werden. Liegt das gewählte Simulationseende zeitlich vor

dem gewählten Simulationsbeginn, wird der Anwender darauf hingewiesen, den Simulationszeitraum sinnvoll anzupassen.

Nach Festlegung des Simulationsexperiments kann der Prozess zur Durchführung der dynamische Simulation auf Knopfdruck gestartet werden: in der im Jupyter-Notebook hierfür zuständigen Python-Codezelle (in der Voreinstellung für den Anwender verborgen) wird OpenModelica dann über seine Python-Schnittstelle angewiesen, das passende Modelica-Modell auszuwählen, gegebenenfalls den Modell Quellcode zu kompilieren und danach das Simulationsmodell zu berechnen.

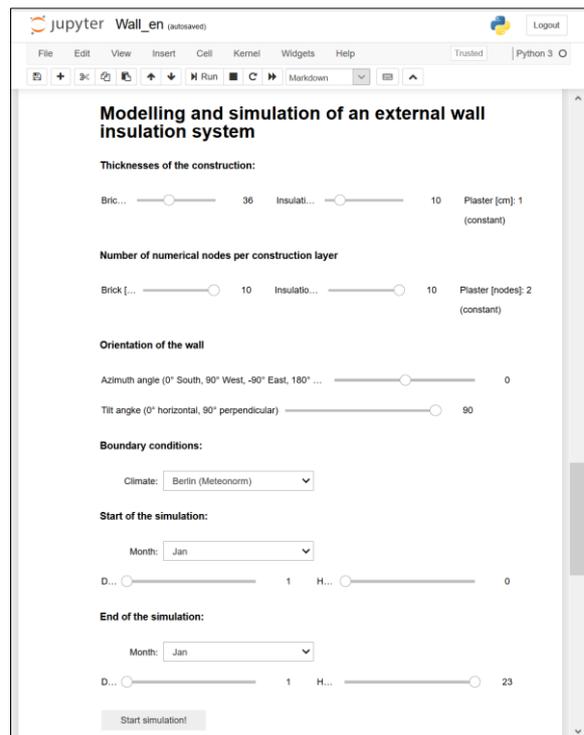


Abbildung 13: Parametrisierung des WDVS-Modells über die Nutzerschnittstelle des Jupyter-Notebooks

Dem folgenden Python-Code können die einzelnen Schritte der Modellauswahl- und Parametrisierung, der Festlegung des Simulationsexperiments sowie des Modellstarts entnommen werden:

```
def startSimulation(startTime, stopTime):
    """model selection and definition of the
    simulation experimen"""
    global mod
    if str(climateBC.value)=='constant':
        mod=ModelicaSystem("WallWDVSConstantBC",
            ["Modelica", "BuildingSystems"])
    elif str(climateBC.value)=='San Francisco':
        mod=ModelicaSystem("WallWDVSSanFrancisco",
            ["Modelica", "BuildingSystems"])
    else:
        mod=ModelicaSystem("WallModels.WallWDVS",
            ["Modelica", "BuildingSystems"])
        mod.setParameters(
            ["wall.constructionData.thickness[1]
            "+str(thicknessBrick.value/100),
            "wall.constructionData.thickness[2]
            "+str(thicknessInsulation.value/100),
            "wall.constructionData.thickness[3]=0.01",
            "wall.nNodes="+str(nodesBrick.value)+",
            "+str(nodesInsulation.value)+", 2",
            "wall.angleDegAzi=
            "+str(azimuthAngleWall.value),
```

```

"wall.angleDegTil=
"+str(tiltAngleWall.value)])
mod.setSimulationOptions(
  ["startTime="+str(startTime),
   "stopTime="+str(stopTime),
   "stepSize=1800.0"])
mod.simulate()
out.clear_output()

def sim_button_clicked(b):
    """Simulation time period check and
    start of the simulation experiment"""
    with out:
        out.clear_output()
    if stopTime > startTime:
        out.append_stdout("Simulation has started")
        startSimulation(startTime,stopTime)
        out.append_stdout("Simulation finished")
    else:
        out.append_stdout(
            "startTime is greater than stopTime ->
            please, reduce startTime !")

simButton.on_click(sim_button_clicked)

```

Nach Abschluss der Simulationsexperiments bekommt der Nutzer eine Rückmeldung über die vollständig abgeschlossene Berechnung. Die zum Verständnis der Simulationsanalyse wesentlichen Ergebnisse werden in Form von Zeitreihen, im vorliegenden Beispiel über einen Zeitraum von 12 Tagen im Juli, visualisiert (siehe Abbildung 14).

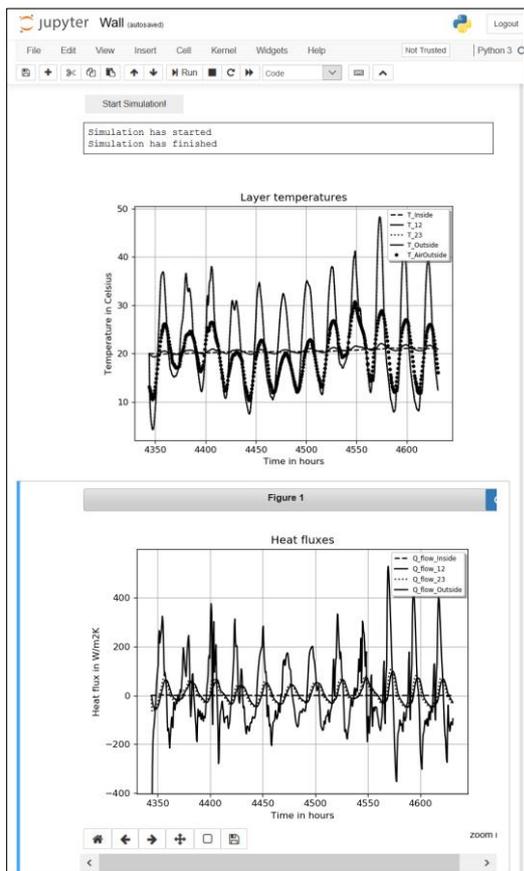


Abbildung 14: Simulierte Temperaturen (oben) und Wärmeströme (unten) an den Bauteiloberflächen sowie zwischen den Bauteilschichten der WDVS-Konstruktion

Alternativ kann im Online-Simulationswerkzeug auch eine Variante für erfahrene Nutzer gewählt werden, welche einen direkten Zugriff auf den Quellcode der Modelica-Modelle erlaubt (vgl. Abbildung 15).

Abbildung 15: Modelica-Quellcode des WDVS im Jupyter-Notebook

Technisch wird dies über den OpenModelica-Kernel für Jupyter-Notebook realisiert (Jupyter OpenModelica, 2020), welcher das direkte Editieren, Übersetzen und Ausführen von Modelica-Modellen in Jupyter-Notebooks unterstützt.

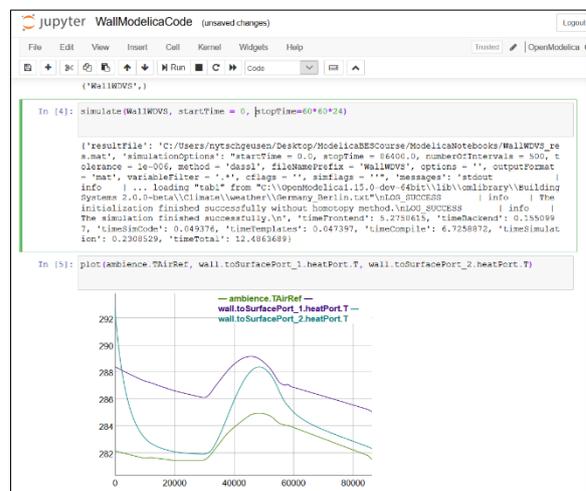


Abbildung 16: Ausführen einer Simulation durch Nutzung der OpenModelica-API in Jupyter-Notebook
Durch das Aufrufen bestimmter Funktionen der OpenModelica-API wie `simulate()` oder `plot()`, können Simulationsexperimente, definiert, gestartet bzw. Ergebnisse geplottet werden (vgl. das Jupyter-Notebook in Abbildung 16).

Thermische Solaranlage

Im zweiten Anwendungsbeispiel wird zunächst die Funktionsweise einer thermischen Solaranlage zur Warmwasserbereitung allgemein und an Hand ihrer Hauptbestandteile Solarkollektor, Solarspeicher, Wärmetauscher, Hydraulik, Nachheizsystem und

Verbraucher und ihrem Zusammenwirken als energietechnisches System über eine Skizze und erläuternden Text beschrieben (Abbildung 17).

Solar thermal systems

Functionality of a solar thermal system (text and image source: www.baunetzwissen.de)

A thermal solar system consists of a solar collector (1), a control unit with pumps (2) and a hot water tank (3). The collector contains black coated absorbers (aluminum or copper sheet) that are heated by the sun. The absorber sheet acts as a radiation trap. Glass cover and thermal insulation on the back of the collector prevent the captured energy from being lost again. The heat is given off to a heat transfer medium (air or solar fluid) that flows through the absorber.

An anti-freeze in the closed collector circuit prevents the system from freezing in winter. The water-antifreeze mixture is transported to the storage tank by a pump in well-insulated pipes in the solar circuit. There is a heat exchanger in it, where the heat is transferred to the water in the storage tank. If necessary, an additional heating source warms up the storage water. The storage heat is fed into the plumbing and heating installation in the house. The solar fluid cooled by the heat exchanger flows back into the collector.

The electronic controller on the solar station controls the solar pump via the temperature difference between the collector and the storage tank. The solar station is a completely prefabricated unit. It contains a circulation pump, gravity brake, safety fittings, shut-off valves, breather, drainage and thermometer. A membrane expansion vessel compensates for changes in volume of the solar fluid and keeps the operating pressure in the system constant.

Abbildung 17: Beschreibung des Anwendungsbeispiels Thermische Solaranlage zur Warmwasserbereitung

In diesem Jupyter-Notebook-Beispiel sind die klimatischen Randbedingungen unveränderlich festgelegt (Standort in El Gouna (Ägypten) am Roten Meer). Im Webbrowser lassen sich folgende Anlagenparameter variieren (Abbildung 18):

- **Kollektorfläche:** durch Anpassung der Kollektorfläche zwischen 1 m² und 20 m² in 1 m²-Schritten, kann die Auswirkung auf die Temperaturniveaus in den Systemkomponenten Kollektor und Speicher analysiert werden.
- **Speichervolumen:** durch Anpassung des Speichervolumens zwischen 10 und 1000 Litern in 10 Liter-Schritten kann die Auswirkung auf die Temperaturschichtung im Solarspeicher untersucht werden.

Weiterhin kann der Anwender zwischen zwei verschiedenen Anlagenvarianten mit externem und internem Wärmetauscher zwischen Solarkreis und Solarspeicher wählen (vgl. die beiden Anlagenschaubilder in Abbildung 18), wobei die technischen Unterschiede zwischen beiden Systemen im einführenden Text des Anwendungsbeispiels erläutert werden.

Modelling and Simulation of a solar thermal system

System parameter:

Kollektor area [m²]: 4

Storage volume [m³]: 200

System variants:

Variant: Storage with external heat exchanger

Start of the Simulation:

Month: Jan

Day: 1 H... 0

End of the Simulation:

Month: Jan

Day: 1 H... 23

Start Simulation!

Abbildung 18: Parametrisierung des Modells der thermischen Solaranlage über die Nutzerschnittstelle des Jupyter-Notebooks

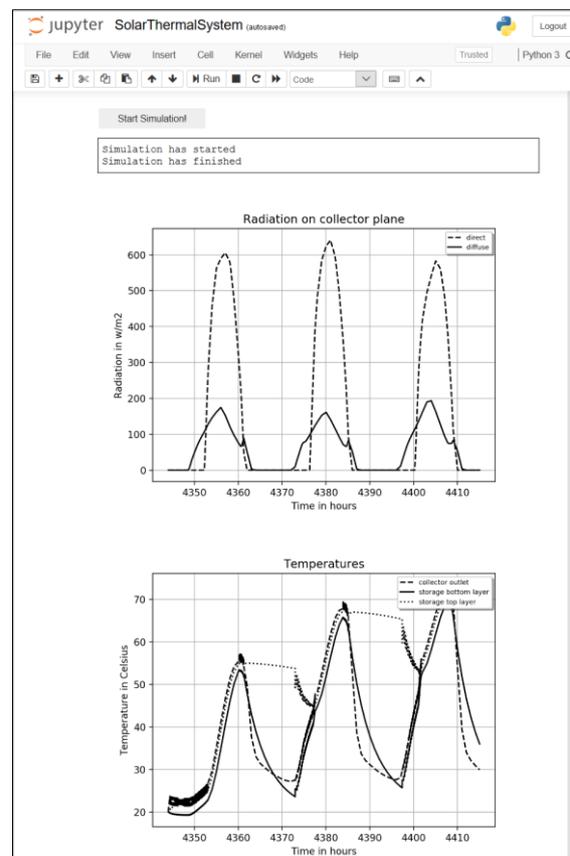


Abbildung 19: Simulationsergebnisse für die Anlagenvariante mit externem Wärmetauscher

Abbildung 19 zeigt die Simulationsergebnisse über einen Simulationszeitraum von drei Tagen im Juli für eine Anlage mit 4 m² Kollektorfläche und einem Speichervolumen von 290 Litern. Das obere Diagramm zeigt die direkte und diffuse Einstrahlung auf die nach Süden ausgerichtete und mit 30° geneigte Kollektorfläche, das untere Diagramm die Fluidtemperaturen im Kollektormodell sowie der obersten und untersten Fluidschicht im Solarspeichermodell.

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag wurde der Prototyp eines Online-Simulationswerkzeuges auf Basis von Jupyter-Notebook, JupyterHub und OpenModelica vorgestellt. Durch die Client-Server-Architektur von JupyterHub ist es möglich, das Online-Simulationswerkzeug auch für größere Übungsgruppen in Lehrveranstaltungen zu verwenden. Alle Bestandteile des Online-Simulationswerkzeuges inkl. der genutzten Modelica-Bibliotheken sind als Open Source-Software frei verfügbar und ohne Hindernisse für die Lehre nutzbar.

Mit Hilfe von zwei Anwendungsbeispielen aus der Bauphysik und der Gebäudetechnik konnte gezeigt werden, dass durch entsprechend aufbereitete Jupyter-Notebooks eine einfache Durchführung von Simulationsanalysen über Auswahlmenüs und Schieberegler zur Parameteranpassung auch für wenig versierte Nutzer möglich ist, da das für das Simulationsexperiment verantwortliche Modelica-Modell auf diese Weise vollständig im Hintergrund verborgen bleibt. Durch die ergänzenden erläuternden Beschreibungen und Abbildungen in den Jupyter-Notebooks können die simulationsbasierten Aufgaben in der Lehre zudem selbsterklärend gestaltet werden.

AUSBLICK

Ausgehend von dem jetzigen Entwicklungsstand des Prototyps sollen zukünftig Erweiterungen am Nutzerinterface vorgenommen werden, was vor allem eine umfangreichere Möglichkeit zur Modellparametrisierung betrifft. In einen nächsten Schritt sollen Simulationskurse für Fragestellungen der Bauphysik und der energetischen Gebäudetechnik entwickelt werden, welche jeweils eine größere Anzahl aufeinander aufbauender Jupyter-Notebooks enthalten. Diese sollen dann in Lehrveranstaltungen für Studierende der Architektur und der Energietechnik in der praktischen Anwendung evaluiert werden. Für diesen Zweck sollen auch die Möglichkeiten des Postprocessing erweitert werden, um neben der Darstellung von Zeitreihen auch kumulierte oder durchschnittliche Größen, wie z.B. monatliche Energiemengen oder die solare Deckungsrate eines solarthermischen Systems über einen Zeitraum visualisieren zu können.

LITERATUR

IBPSA Project 1, 2020. Webpage IBPSA Project 1. BIM/GIS and Modelica Framework for building and community energy system design and

operation: <https://ibpsa.github.io/project1>, letzter Zugriff 2.4.2020.

Jupyter Notebook 2020. Webpage Jupyter-Projekt: <https://jupyter.org>, letzter Zugriff 2.4.2020.

Jupyter OpenModelica 2020. GitHub-Repository <https://github.com/OpenModelica/jupyter-openmodelica>, letzter Zugriff 2.4.2020.

JupyterHub, 2020. Webpage JupyterHub-Projekt: <https://jupyterhub.readthedocs.io>, letzter Zugriff 2.4.2020.

Mehra, S.-R., Sedlbauer, K. 2004. Innovative Lehr- und Lernmethoden in der bauphysikalischen Ausbildung. Bauphysik. 26. 385 - 391. 10.1002/bapi.200490100.

Markdown, 2020. Webpage Markdown-Spezifikation: <https://daringfireball.net/projects/markdown>, letzter Zugriff 2.4.2020.

Marsh, A. 2020: Web Applications of Andrew Marsh <http://andrewmarsh.com/software/#applications>, letzter Zugriff 2.4.2020.

Modelica 2020. Webpage Modelica-Association: <https://modelica.org>, letzter Zugriff 2.4.2020.

Nytsch-Geusen, C., Banhardt, C., Inderfurth, A., Mucha, K., Möckel, J., Rädler, J., Thorade, M., Tugores, C. 2016. BuildingSystems – Eine modular hierarchische Modell-Bibliothek zur energetischen Gebäude- und Anlagensimulation. Proceedings BAUSIM 2016. Dresden.

OMWebBook 2020. Webpage OMWebBook: <http://omwebbook.openmodelica.org>, letzter Zugriff 2.4.2020.

OpenModelica 2020. Webpage OpenModelica-Projekt: <https://openmodelica.org>, letzter Zugriff 2.4.2020.

Polysun Online 2020: Webportal Online-Version Polysun: <http://www.polysunonline.com>, letzter Zugriff 2.4.2020.

PVSol Online 2020: Webportal Online-Version PVSol: <http://pvsol-online.valentin-software.com>, letzter Zugriff 2.4.2020.

The Littlest JupyterHub 2020. Webpage The Littlest JupyterHub-Projekt: <http://tljh.jupyter.org>, letzter Zugriff 2.4.2020.

TSol Online 2020: Webportal Online-Version TSol: <http://valentin.de/calculation/thermal/system/ww/de>, letzter Zugriff 2.4.2020.

Wetter, M., van Treeck, C., Helsen, L., Maccarini, A., Saelens, D., Robinson, D., Schweiger, G. 2019. IBPSA, Project 1: BIM/GIS and Modelica framework for building and community energy system design and operation—ongoing developments, lessons learned and challenges. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.

LEHRKONZEPTE DER BUILDING PERFORMANCE SIMULATION FÜR ARCHITEKTURSTUDIERENDE

H. J. Schmitz¹

¹Frankfurt University of Applied Sciences, Frankfurt, Germany (FRA-UAS)

KURZFASSUNG

Architekten sind Schlüsselpersonen im Planungsprozess von Gebäuden. Die Building Performance Simulation (BPS) ist ein wichtiges Instrument, die Performance von Gebäuden vorherzusagen und zu optimieren. Um den größtmöglichen Nutzen aus der Gebäudesimulation zu ziehen, muss man dieses Instrument also möglichst schon den Architekturstudierenden nahebringen. Aus zunehmender Affinität der Studierenden zu digitalen Werkzeugen einerseits und dem Druck des Klimawandels andererseits sind Lehrveranstaltungen zu Simulationstools gefragt, die Gebäude nicht nur gestalterisch abbilden. In diesem Artikel werden die didaktische Grundlage, allgemeine Lehrkonzepte sowie Erfahrungen mit einem spezifischen Lehrangebot besprochen.

ABSTRACT

Architects are key professionals in the building design process. Building Performance simulation (BPS) is a mighty instrument to predict and optimize building performance. This instrument must though be introduced to the architecture students in order to benefit best from its opportunities. Increasing affinity of students for digital tools on one hand and the pressure of climate change on the other bring great demand to courses on simulation tools to support the design process complementary to the topic of appearance. In this paper, the didactic basics, general teaching concepts and experiences are given from collected and own courses.

RAHMEN

Die Randbedingungen für das Planen von Gebäuden unterliegen aktuell einem radikalen Wandel, der sich in der Lehre erst langsam niederschlägt. Die endlich auch im Bauwesen einsickernde Erkenntnis der „Grenzen des Wachstums“ (Meadows et al. 1972) macht ein umfassendes Umdenken des Bauens erforderlich. Die aktuell an die Universitäten drängende Generation hat die Fridays4future Bewegung mit ins Leben gerufen und fragt intensiv nach nachhaltigen Bau- und Betriebsweisen. Die sich im Klimawandel unverkennbar verändernden Rahmenbedingungen einerseits und die Inflation an Baukonstruktionen und technischen Möglichkeiten andererseits verlangen, Architektur kontextbezogen

sehr schnell neu zu definieren. Die dringend notwendige Energie- und Ressourcenwende erfordert ganz neue Planungsweisen. Es steht für diese radikale Herausforderung keine erprobte Bautradition zur Verfügung. Die Aufgabe, Architekten die dafür notwendigen Methoden und Kompetenzen im Studium zu vermitteln, erfordert auch ein methodisches Umdenken in der Konzeption des Architekturstudiums.

Dabei ist der notwendige systematische Ansatz für eine performativen Architektur bei weitem nicht neu: „Die Architektur wird in Hinsicht auf ihre energetische Performance entwickelt. Doch beim Entwerfen entzieht sich das vom Haus erzeugte energetische Feld der Anschauung. Die Zeichnung sagt uns nicht, wo es kalt oder warm ist, wo es hell oder dunkel ist, wo es zugig oder stickig ist. Hier hilft uns zuerst die Erfahrung: Wir kennen viele Räume und wissen, ob sie behaglich sind oder nicht. [...] Ebenso gibt es Computerprogramme, die Luftströmung, Wärmeverteilung, Lichteinfall und Schallausbreitung simulieren. All diese Verfahren visualisieren die diskreten Volumen von Licht, Luft, Klang und Wärme. Sie führen uns vor Augen, daß unser Entwurf jenseits der visuellen Form ganz andere Dimensionen besitzt. Und diese anderen Raumdimensionen sind ständig im Wandel, verändern sich stündlich, täglich und übers Jahr.“ (Oswald 1992) Trotz der einen oder anderen begrifflichen Unschärfe zeigt diese Betrachtung, wie das Potential der BPS bei Architekten geschätzt wird.

Der Vermittlung von Grundkenntnissen dieses Werkzeuges ist bedeutungsvoll. Die International Building Performance Simulation Association (IBPSA) widmet sich im Education Committee unter anderem den „education and training needs throughout the building simulation performance community including academia, private sector and government.“ (IBPSA 2020) Die zu Beginn meist für Experten entwickelten tools haben erstens aufgrund der Verbreitung leistungsfähiger Computer und zweitens der Einführung softwaregestützter Planungsmethoden inzwischen die Möglichkeit einer breiten Anwendbarkeit erreicht. Die dritte Komponente für den sinnvollen Einsatz dieser Möglichkeiten ist die Vermittlung der Kompetenzen zur Anwendung.

„The teaching of BPS is a topic, that deserves as much attention as the development and validation of models and simulation tools.“ (Beausoleil-Morrison 2015)

Architekten sind anders

Architekten sind als Zielgruppe für die Lehre der Gebäudesimulation wichtig. Architekturstudierende im Masterstudium sind nahe am Einstieg in die Berufspraxis und werden die Zukunft des Bauens maßgeblich mitgestalten. Als Generalist muss der Architekt später die Planungsleistungen seines Teams soweit verstehen, dass er diese koordinieren kann.

Sind bei klassischen Ingenieurwissenschaften zunächst Aufgaben mit linearen numerischen Lösungswegen Lehrinhalt, werden Architekten von Beginn des Studiums an mit iterativen Lösungsprozessen für meist zunächst unscharfe Aufgabenstellungen vertraut gemacht. Entwerfen ist Experimentieren. Insofern ist das Architektendenken im Grunde dem Vorgehen in der Simulation schon recht nahe. Auf der anderen Seite bedingt diese Art der Lehre oft eine Ausrichtung auf Ergebnisse, die sich in einem Plan und einem analogen Modell abbilden lassen. Numerische Ergebnisse bleiben für Architekten daher oft abstrakt und müssen in ihrer Bedeutung für das Gebäude eingeführt werden.

Die Mindestanforderung an die Lehrziele für die Building Performance Simulation ist, ein Verständnis der dynamischen Prozesse und der Wechselwirkung baulicher, klimatischer und betrieblicher Parameter zu vermitteln. Dabei sollen nicht alle Architekten zu Experten für die Gebäudesimulation werden, aber sie sollen verstehen, was diese – besonders in den frühen Planungsentscheidungen- zum Entwurf beitragen kann. So soll die Kompetenz geschaffen werden, die richtigen Fragen zu stellen und die Antworten einordnen zu können. Im Idealfall wird die Simulation im Studium aber auch zur Initialisierung, mit der Performance der Architektur zu experimentieren.

LEHRE DER GEBÄUDESIMULATION

Lerntheorie

Für die Lerntheorie ist zunächst festzulegen, welches Lernziel verfolgt werden soll. In der Übersicht zu verschiedenen Lehrprogrammen der BPS werden in einer Metastudie zu insgesamt 37 verschiedenen dokumentierten Lehrmodulen die zukünftigen Rollen der Architekten hinsichtlich der Gebäudesimulation im Planungsprozess untersucht. Hier werden im Wesentlichen drei mögliche Rollen identifiziert: Performer, Consumer, Expert. (Alsaadani & Bleil De Souza 2019) Der „Expert“ ist ein Anwender der Gebäudesimulation, der die Theorie und die Methoden im Detail beherrscht, komplexe Simulationsaufgaben modellieren, Ergebnisse interpretieren und sicher validieren kann. Hierfür ist umfangreiches bauphysikalisches und technisches Vorwissen erforderlich, das Architekten als Generalisten nur im Fall besonderen Interesses mitbringen. Der

„Consumer“ beschränkt sich auf die Grundkenntnisse zu Simulationsverfahren und kann mit einem Experten im Dialog die Fragestellungen für die Simulation definieren und die Ergebnisse interpretieren, um diese dann in den Entwurfsprozess zu integrieren. Einen breiten Ansatz, diese Kompetenz mit geringem Zeitaufwand in die Lehre der Architektur zu integrieren wird in Form eines spielbasierten 90min Kurs zur Gebäudesimulation vorgeschlagen. Eine so kurze Lehrveranstaltung kann natürlich lediglich ein Grundverständnis vermitteln und bestenfalls Interesse wecken. „In their essays all groups reported that they enjoyed the exercise and found the game to be an effective and engaging teaching method. At the same time, there was a ubiquitous feeling that the 90 minute game had been too short and hence resulted in a fair amount of guess work.“ (Reinhardt 2011) Hierbei stellt sich die Frage, wie diese Einführung sinnvoll fortgeführt werden kann.

Die meisten Lehrveranstaltungen aus der Metastudie zielen deshalb darauf, den Architekten zum „Performer“ auszubilden, der die grundlegenden Simulationen selbst durchführen kann, um frühe Entwurfsentscheidungen damit zu unterstützen. „Rather than using BPS to analyze performances of fully-developed designs, all describe using BPS to support an evidence-based design process, whereby BPS tools are used to support the synthesis of design ideas.“ (Alsaadani & Bleil De Souza 2019) Erst in komplexen Fragestellungen wird der Dialog mit dem Experten erforderlich. Etabliert in den verschiedensten Lehrprogrammen hat sich die Strukturierung einer Simulation mit aufeinander aufbauenden Parametern.

Heutige Software ermöglicht es häufig, nach nur kurzer Einführung mit den vom Programm vorgegebenen Voreinstellungen eine Simulation durchzuführen. Die Ergebnisse sind im Rahmen der Voreinstellungen zunächst nicht falsch. Die Herausforderung in der Lehre ist jedoch, die Kompetenz zu vermitteln, Simulationen mit validierbaren Ergebnissen für eigene Modelle zu generieren. Alle Lehrerfahrungen und vielfach auch Auswertungen von Gebäudesimulationen in der Praxis zeigen hier eine überraschende bis erschreckende Bandbreite der Ergebnisse. Dies erschüttert bei der Einführung der Simulation zunächst das Vertrauen in die Methode, erwartet man doch von aufwendigen Programmen und schnellen Rechnern exakte Ergebnisse. In „Learning the fundamentals of BPS“ nennt Beausoleil-Morrison (2019) dies die „credibility gap“. Damit für die spätere Berufspraxis eine belastbare Simulationskompetenz entsteht, muss in der Lehre diese Bandbreite der Erstergebnisse analysiert, verstanden und durch eigene Erfahrungen der Studierenden weitgehend überwunden werden. Ansonsten bleibt als Ergebnis der Lehrveranstaltung schlimmstenfalls eine grundlegende Skepsis gegenüber der Methode.

Nach einer theoretischen Einführung wird eine einfach parametrisierte Simulationsübung durchgeführt. Die Validierung und die Interpretation der Ergebnisse ist für die Studierenden eine wichtige Voraussetzung für das richtige Verständnis der Gebäudesimulation.

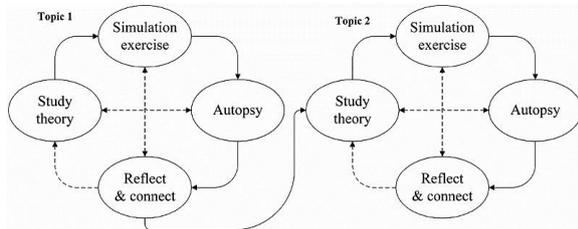


Abbildung 1: Lernschema nach Beausoleil-Morrison

Hier erfolgt der Übergang vom reinen „Consumer“ zum „Performer“ mit eigener Simulationskompetenz. Es ist dazu unerlässlich die unweigerlich diversen Ergebnisse der Studierenden systematisch zu untersuchen und ggf. in einer weiteren Schleife anzugleichen, bevor neue Parameter in die Simulation eingeführt werden. Für die Lehre der Gebäudesimulation ist daher besonders ein Verfahren geeignet, das allgemein als „Experimental Learning“ unabhängig von den Lehrinhalten beschrieben wurde. Aus den Lerntheorien von Dewey, Lewin und Piaget leitet Kolb eine Lerntheorie ab, die Erfahrung in den Mittelpunkt des Lernprozesses stellt. „The [...] reason is to emphasize the central role that experience plays in the learning process. This differentiates experimental theory from rationalist and other cognitive theories of learning.“ (Kolb 1984) Dieser lerntheoretische Ansatz ist in der Lehre der Architektur generell stark vertreten und ist auch für die Gebäudesimulation in einen iterativen Lernprozess gut umzusetzen.

Lehrkonzepte

Der große Teil der beschriebenen und auch der eigenen Lehrprogramme für Architekten umfassen im Wesentlichen drei, manchmal vier Stufen.

Die erste Stufe ist die Vermittlung der Grundbegriffe
 Modell (Abstraktion)
 Parameter
 Verifizierung
 Interpretation
 Übertragung

Hier kann es den Studierenden helfen, zunächst eine Simulation zu analysieren, die aus einem ganz anderen Umfeld kommt (Verkehr, Wetter,...) die zum Teil in Echtzeit aufrufbar sind und die Grundlage der Simulationstheorie veranschaulichen können. Insbesondere das dynamische, agentenbasierte Modell der Verkehrssimulation (<https://traffic-simulation.de>) ist geeignet, relativ schnell einen visuellen Zugang zur Simulationstheorie zu vermitteln (Treiber & Kesting 2010). Zudem gibt es einen Anreiz zum spielerischen

Umgang mit den Parametern und ist daher ein guter Motivator, sich zu Beginn eines Kurses mit der Theorie zu befassen. Zum Kursbeginn müssen auch die lokalen Wetterdaten als grundlegender dynamischer Parameter der BPS eingeführt werden. Diese erste Stufe ist kurz, aber sehr wichtig.

Die zweite Stufe ist die Einführung der Methode und der Software mit einfachen Modellvorlagen und systematischer Betrachtung einzelner Parameter. Hierbei kann je nach Qualität der tools auf tutorials der Softwareanbieter zurückgegriffen werden. Es hat sich bewährt, hier wirklich einzelne bauliche Parameter zu isolieren und zunächst z.B. nur den dynamischen Wärmestroms eines Wandaufbaus im Tagesgang der Temperatur und Einstrahlung zu simulieren. Das Modell ist sehr überschaubar.

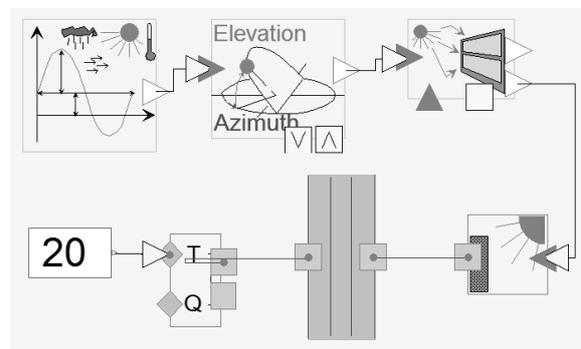


Abbildung 2: Modell einer Außenwand gegen konstante Innentemperatur zur Ermittlung der Wärmeströme

Dennoch können hier bereits die Parameter der Himmelsrichtung, des Dämm- und Speicherverhaltens und der Phasenverschiebung analysiert werden.

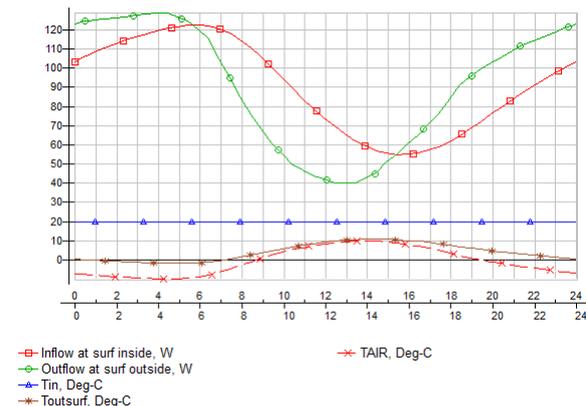


Abbildung 3: Phasenverschiebung der Wärmeströme bei einer monolithischen Wand

Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass die Fehlerquote minimal ist, und daher von allen Studierenden schnell übereinstimmende Ergebnisse erzielt werden. Diese können dann exemplarisch analysiert und in Experimenten mit dem Modell sehr schnell variiert werden. Lässt man die Studierenden zunächst etwa die Hälfte der Lehreinheiten parallel zur

Vorstellung der Software mit solch einfachen Modellen Parameterstudien erstellen und diese in einer Zwischenpräsentation vorstellen, ergibt das für den gesamten Kurs einen guten Überblick über die Bandbreite der Parametrierung einer BPS und durch die Gruppe kann auch eine gewisse Verifizierung der Ergebnisse erfolgen. Als Zwischenergebnis werden in den eigenen Kursen Analysen der Wechselwirkung zweier Parameter verlangt, die sich auf die passive klimatische Performance einfacher Zonen auswirken.

Um die Simulation als Methode in der dritten Stufe in konkrete Architektur zu überführen, braucht es eine baulich einfache, klimatisch aber z.B. herausfordernde Aufgabenstellung. Bewährt hat sich in eigenen Lehrveranstaltungen etwa das rein passive Ferienhaus in günstigen Klimaregionen bis hin zu z.B. Forschungsstationen an extremen Standorten (Wüste, Arktis, extraterrestrisch) in Lehrveranstaltungen anderer Hochschulen.

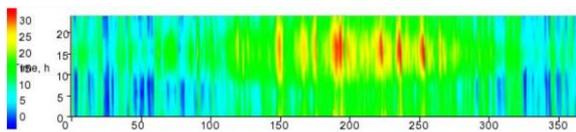


Abbildung 4: günstiger Klimastandort für ein rein passives Ferienhaus (ASHRAE IWEC2 Weather File for NANTES.)

Alternativ wurde die „Nachsimulation“ eines mit verfügbaren Angaben zur Baukonstruktion, Betriebsweise und realen Messdaten aus einem Monitoring gut dokumentierten Gebäude angewendet. Die Vor- und Nachteile dieser Varianten der Aufgabenstellung werden im Abschnitt „Ergebnisse“ diskutiert. In der dritten Stufe sollen die bisherigen Experimente gezielt in von den Studierenden selbst erstellten Modellen eingesetzt werden und dazu führen, ein Design zu entwickeln oder nachzuvollziehen. Diese Stufe ist in der Regel sehr betreuungsintensiv, so dass neue Parameter nur noch aufgabenspezifisch eingeführt werden können.

Manche Lehrkonzepte widmen sich in einer vierten Stufe auch der Gebäudetechnik und betrachten dabei beispielsweise verschiedene technische Varianten der Wärmeversorgung und -übergabe. Aus der eigenen Erfahrung füllen die ersten drei Stufen zeitlich schon den Rahmen eines Wahlpflichtfaches mit vier Unterrichtsstunden pro Woche nebst der Eigenarbeit der Studierenden völlig aus, so dass in der vierten Stufe nur noch bei sehr gutem Vorwissen oder extrem engagierten Studierenden ein sinnvoller Lerneffekt erzielt wird. Der Schwerpunkt auf baukonstruktiven Lösungen und intelligenten Regelungen –etwa für den Sonnenschutz und die Fensteröffnung– bietet für den Einstieg eine ausreichende Herausforderung und fördert, kreative bauliche Lösungen mit der Simulation zu entwickeln.

Der Kurs wird als Wahlpflichtfach im Master Architektur unter dem Namen „Klimadesign“ in jedem zweiten Semester angeboten. Die hier beschriebenen Kursinhalte wurden seit 2016 dreimal deutsch und einmal englisch, dann mit MA-Studierenden des internationalen Master Advanced Architektur durchgeführt. Insgesamt basieren die Erfahrungen auf 78 abgegebenen Arbeiten.

Die folgende Tabelle zeigt die Organisation eines Lehrmoduls im Rahmen eines Wahlpflichtfaches für Masterstudierende der Architektur an der FRA-UAS.

Tabelle 1:
Gliederung der Lehrinhalte

Stufe	Lehrinhalt	Methode	Lehrziel
I	Simulation	Beispiele	Grundverständnis der Begriffe
I	Klima	Grafiken	Parameter
II	Hülle	BPS-tool	Parameter, Modellierung
II	Fenster	BPS-tool	Parameter, Modellierung
II	Nutzer	BPS-tool	Verifizierung
II	Komfort	BPS-tool	Parameter, Modellierung
II	Lüftung	BPS-tool	Parameter, Modellierung
P1	Zwischenpräsentation	Ergebnis	Modell, Parameter, Verifizierung
III	Steuerung	BPS-tool	Modellierung
III	Auswertung	BPS-tool	Interpretation
III	Betreuung	BPS-tool	Interpretation
III	Betreuung	BPS-tool	Übertragung
P2	Präsentation	Ergebnis	Interpretation, Übertragung

Zu Beginn der Lehrveranstaltung hat sich eine sehr strukturierte Wiederholung und Zuordnung der Grundbegriffe bewährt. Durch die Übertragung der eigenen Experimente in die Struktur festigt sich ein Verständnis davon, was man gerade tut. Vor allem die Parametrierung von Steuerelementen wird VOR der Eingabe in die Nutzeroberfläche des tools als Beschreibung abgefragt. Zu jedem Simulationslauf wird eine Fragestellung definiert, um prüfen zu können, ob das Modell adäquat abstrahiert wurde, um diese mit den erwarteten Ergebnissen beantworten zu können.

ERGEBNISSE:

Wie in jeder Lehrveranstaltung ist zuerst eine klare Vorstellung des Lernzieles und der Aufgabe grundlegend. Die Studierenden können sich dann von Beginn an im Verlauf des Kurses orientieren. Die Aufgabe sollte so einfach sein, dass der Schwerpunkt auf dem Erlernen der Methode liegen kann. Insofern scheint das „Nachsimulieren“ eines existierenden Gebäudes mit verfügbaren Daten sehr geeignet. Demgegenüber führen die Betrachtung der gebäudetechnischen Komponenten und die Differenzierung verschiedener Energiebedarfe zu einer Komplexität, bei der die Architekturstudierenden zum Teil dazu neigen, das Interesse zu verlieren. Für Architekten zunächst attraktiver ist daher die Möglichkeit, die Simulation als Hilfsmittel für eine eigene Bauaufgabe einzusetzen. Letztlich ist dies auch die Kompetenz, die Studierende durch den Kurs erwerben sollen. Hier sind Entwurfsaufgaben mit wenigen Zonen in möglicherweise besonderen Klimarandbedingungen in den eigenen Kursen wie auch an anderen Hochschulen recht erfolgreich gestellt worden.

Motivation

Wenn das Modul als Wahlpflichtfach im Master Architektur angeboten wird, bringen die Studierenden meist schon eine Vorstellung und Interesse in die Lehrveranstaltung ein. Die Nachfrage nach dem Modul ist groß.

Erste Erfolge in der Anwendung der verwendeten tools vermitteln den Studierenden schnell ein Erfolgsergebnis und motivieren zu eigenen Experimenten. Hierfür ist eine Zugänglichkeit des tools auch außerhalb der Lehrveranstaltungen unbedingt erforderlich.

Frustration

Werden in der dritten Stufe Simulationsmodelle aus eigenen Entwürfen erstellt, beginnen die Studierenden zu experimentieren. Dies geschieht bewusst sehr frei, um Möglichkeiten der Methode auszuloten. Es zeigt, sich dass manche Studierende hier sehr kreativ in der Parametrierung eigener Modelle werden. In dieser Stufe ist es wichtig, die Studierenden anzuleiten, ihre Experimente zu dokumentieren und sorgfältig zu analysieren, damit daraus ein wachsendes Verständnis entsteht.

Nicht selten kommt es auch dazu, dass fehlerhafte Modelle der Studierenden anfangs nicht „laufen“ bzw. unplausible Ergebnisse liefern. Hier ist eine intensive Betreuung erforderlich. Idealerweise arbeiten die Studierenden spätestens jetzt in kleinen Gruppen, um sich gegenseitig mit den in der zweiten Stufe bereits erworbenen Erfahrungen unterstützen zu können. Dennoch bleibt der individuelle Betreuungsaufwand in dieser Stufe recht hoch. Hilfreich sind Programme, die Fehler schnell identifizierbar und editierbar machen.



Abbildung 2: aus einer Zwischenpräsentation

Kryptische Fehlermeldungen können Lehrende und Lernende gleichermaßen zeitlich überfordern. Mit zunehmender Lehrerfahrung kann man viele Standardfehler der Studierenden meist schnell lösen. Manchmal sind Modelle aber so falsch parametrisiert, dass eine vollständige Fehleranalyse kaum noch möglich ist. Dann hilft oft nur noch eine komplett neue Modellierung.

Interpretation

Sobald die ersten Simulationen der Studierenden plausible Ergebnisse liefern, stellt sich das Erfolgserlebnis ein, mit dem eigenen Modell verwendbare Ergebnisse produziert zu haben. Es gilt dann die Phase des Experimentierens offen zu lassen, auf der anderen Seite aber auch Hilfen zu geben, sich nicht in den unzähligen möglichen Variationen zu verlieren. Eine Fokussierung auf die Aufgabe bzw. sich daraus ergebende Fragestellungen ist dann genauso wichtig, wie eine Anleitung zur Dokumentation der Experimente. Hier muss vermieden werden, dass sich die Studierenden im Simulieren verlieren. Für die Interpretation sind die graphischen Ausgabemöglichkeiten der Software entscheidend. Die Interpretation rein numerischer Ergebnisse gelingt Architekturstudierenden eher schlecht. Es zeigt sich, dass auch das Lesen von Diagrammen, Vergleichen von Ergebnissen und das richtige Schlussfolgern angeleitet werden muss.

Lernerfolg

Der Lernerfolg war in den bisher durchgeführten Kursen immer wieder sehr unterschiedlich. Allen Kursteilnehmern konnte das Grundverständnis der für die Modellerstellung notwendigen Abstraktion und der unterschiedlichen Wirkung der klimatischen, baulichen und nutzungsbedingten Parameter vermittelt werden. In der Anwendung der Software haben die Studierenden dann sehr unterschiedliches Engagement gezeigt und entsprechend sind auch die Lernerfolge bei der Verifizierung, der Interpretation und der Übertragung der Ergebnisse sehr unterschiedlich ausgefallen. Bei einigen Studierenden ist die Interpretation der Ergebnisse über die Zonentemperaturen hinaus bruchstückhaft geblieben. Die meisten Studierenden konnten am Ende des Kurses die Energiebilanz der Zonen interpretieren. Je nach Aufgabenstellung wurden auch andere Komfortparameter dann richtig interpretiert. Da die Erstellung eines lauffähigen Simulationsmodells den größten Teil der Betreuungszeit in Anspruch genommen hat, haben fast alle Studierende in der

Schlusspräsentation auf die grafischen Standardausgaben der Software zurückgegriffen, die für Nichtkursteilnehmer sicher kaum verständlich geworden wären. Hier haben sich Studierende anderer Studiengänge (z.B. Bauingenieurwesen) in ähnlich angelegten Kursen mit der Darstellung von Ergebnissen meist leichter getan.



Abbildung 2: Simulationsmodell und Visualisierung eines Studierendenentwurfs des passiven Ferienhauses

Die Übertragung der Ergebnisse in eine eigene Entwurfsaufgabe hat auf Grund der Vorbildung der Architekturstudierenden bei fast allen Kursteilnehmern gut funktioniert. Architekten wollen entwerfen und haben gelernt, in diesen iterativen Prozess gewonnene Erkenntnisse einzupflegen. In jedem Kurs haben auch einige Architekturstudierende mit hohem zeitlichen Einsatz aus offensichtlich gewecktem Interesse so umfangreiche Experimente mit der BPS durchgeführt, dass zum Teil sogar eigene Funktionen neu in die Software integriert wurden, bzw. verschiedene Programme verknüpft wurden. Viele der Studierenden haben die BPS in Folgeprojekten in der Entwurfsphase wieder eingesetzt, wie sich an Betreuungsanfragen früherer Kursteilnehmer in deren weiterem Studienverlauf nachvollziehen lässt.

EVALUATION

Die Evaluationsergebnisse stammen aus insgesamt zwei der in dieser Form durchgeführten Kurse. In beiden Fällen wurden neben diversen individuellen Problemen vor allem zwei Kriterien kritisch bewertet.

- Die Komplexität der verwendeten Software hat gerade zu Kursbeginn viele Studierende stark gefordert.
- Die Kurse waren zu groß, als dass die individuelle Betreuung der Studierenden alle Fragestellungen zeitnah aufgreifen konnte.

Während der zweite Punkt eine wichtige Abwägung zwischen Quantität und Qualität ist, wurden die Kurse

jedoch bewusst auf die eigene Erarbeitung von Parametern ausgelegt und eine entsprechend hohe Komplexität verlangt. Dies hat vor allem zu Beginn der Kurse zu dem Wunsch geführt, dass die Einführung mehr an vorgefertigten Modellen stattfinden sollte. Auch hier stellt sich die Frage, ob eine solche Vereinfachung den gewünschten Lerneffekt erreichen kann. Grundsätzlich wurde der Lernerfolg in den Kursen vergleichsweise hoch bewertet. Einige Studierende wünschten sich noch einen größeren Entwurfsanteil in der Aufgabe und Bewertung. In der Aufgabenstellung war gezielt nur die Bewertung der Simulation angegeben. Im Vergleich mit Kursen für Masterstudierende des Bauingenieurwesens zeigt sich, dass die Architekturstudierenden einen viel stärker experimentellen Anteil der Lehrveranstaltung einfordern.

ZUSAMMENFASSUNG

Obwohl die angehenden Architekten vielfach Digital Natives sind und grundsätzlich wenige Berührungspunkte mit komplexen Programmen haben, stellt sich die Vermittlung eines Grundverständnisses der Gebäudesimulation in der Hochschullehre als überraschend schwierige Aufgabe dar. In der Terminologie der Architekten ist ein „Modell“ etwas Dreidimensionales und sobald Software eine geometrische Schnittstelle bietet, ist es fast nicht mehr möglich, ein „Simulationsmodell“ von der 3D-Darstellung auf dem Bildschirm zu lösen. Der Modellbegriff der Simulation umfasst aber deutlich mehr als die Geometrie. Gewohnt, bauliche Konzepte als Idee in Pläne zu transferieren, fehlt noch die Betrachtung des „Funktionierens“ des Gebäudes unter dynamischen Bedingungen. Der Entwurf wird statisch und vorwiegend gestalterisch gedacht. Dies bestätigt auch die Analyse der Anwendbarkeit von Tools. „Visualization capabilities and ease-of-learning tend to be the criteria used to justify selection of BPS tools used in articles describing the 'performer' paradigm.“ (Alsaadani & Bleil De Souza 2019). Das bedeutet, dass man zunächst für das Grundverständnis einer Simulation die Abstraktion lehren muss, bevor Modelle „einfach visuell“ erstellt werden. Erfahrungsgemäß sollte man daher möglichst abstrakt in den Kurs einsteigen, um diesen wichtigen Schritt nicht zu überspringen. Andererseits muss die Aufgabe schnell genug so konkret werden, dass die Studierenden eigene Simulationsergebnisse in realistische bauliche Fragestellungen übertragen können, da sonst die anfängliche Motivation für die Einarbeitung in das komplexe Thema schwindet. Sofern das gelingt, muss man den Architekten nach Erfahrungen aus eigenen Varianten der Lehrveranstaltung die Möglichkeit geben, die Simulation in eine eigene Entwurfsaufgabe zu überführen. Die Architekturstudierenden sind gewohnt, Lösungen in iterativen Prozessen zu entwickeln. Dies ist für die Nutzung der BPS sehr hilfreich.

Die meisten Architekturstudierenden im Master wollen entwerfen und die Lehrinhalte der angebotenen Wahlpflichtmodule in eigene Ideen umsetzen. Das gelingt bei allen Studierenden mindestens rudimentär, besonders bei technisch interessierten Studierenden oft mit deren hohem zeitlichen Eigenengagement aber auch sehr gut. Übereinstimmend mit den in der Literatur dokumentierten Lehrkonzepten zeigt sich, dass die Einführung der BPS für Architekturstudierende im Master gute Lernerfolge erzielen kann. Die Methoden unterscheiden sich hier trotz unterschiedlicher Software relativ wenig. Um angehenden Architekten die Kompetenz zu vermitteln, die BPS als eine Methode zur Entwurfsfindung einsetzen zu können, muss genau diese parametrische Vorgehensweise der zentrale Lehrinhalt sein.

LITERATUR

- Alsaadani, Sara; und. Bleil De Souza, Clarice 2019 Teaching BPS to architects: A closer look at the building performance simulation 'consumer' and 'performer' training paradigms; Conference Proceedings BSCairo 2019
- Beausoleil-Morrison, Ian 2019. Learning the fundamentals of building performance simulation through an experiential teaching approach, *Journal of Building Performance Simulation*, 12:3, Seite 308-325
- Clarke, Joe 2005. A vision for building performance simulation: *Journal of Building Performance Simulation*, 8:2 Seite 29-43.
- IBPSA Education, <http://www.ibpsa.org/education/> 06.07.2020
- IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE), 2019 Software V 4.7, (www.equa.se) EQUA Simulation AB, Stockholm
- Kolb, David 1984, *Experiential Learning: Experience As The Source Of Learning And Development*, Prentice Hall Inc. Engelwood Cliffs NJ
- Meadows, Donella H. 1972. *The Limits to growth; a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind*. New York: Universe Books.
- Oswald, Philipp 1992; *Wohltemperierte Architektur*, Editorial arch+ 113
- Reinhart, C.; Dogan, Timur; Ibarra, Diego; Samuelson, Holly, 2011 Learning by playing – teaching energy simulation as a game; *Journal of Building Performance Simulation*
- Treiber M. und Kesting A., 2010 *Verkehrsdynamik und -simulation: Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik*, Springer-Lehrbuch, Berlin-Heidelberg

XIII: BIM based planning tools and integration approaches

INTEGRATED REPRESENTATION OF BUILDING SERVICE SYSTEMS: TOPOLOGY EXTRACTION AND TUBES ONTOLOGY

N. Pauen¹, D. Schlütter¹, J. Siwiecki¹, J. Frisch¹ and C. van Treeck¹

¹Institute of Energy Efficiency and Sustainable Building, RWTH Aachen University, Aachen, Germany

ABSTRACT

This paper details parts of the work within the Energie.Digital project which aims at developing an integrated representation of building service systems consisting of technical characteristics, physical and functional semantics as well as operating states and state diagrams. This information needs to be machine-readable and linkable using a global identification key.

The focus of this paper is set on the extraction and aggregation of the semantics of service systems from an Industry Foundation Classes (IFC) file and the development of an ontology based on Semantic Web principles within the environment of the Linked Building Data Community Group of the W3C.

KURZFASSUNG

In diesem Beitrag werden die aktuellen Ergebnisse des Forschungsprojekts Energie.Digital vorgestellt. Ziel des Projekts ist eine integrale digitale Beschreibung der technischen Gebäudeausstattung. Dies umfasst Informationen zu den physikalischen und funktionalen Verknüpfungen, den technischen Eigenschaften der Komponenten, sowie zu Betriebsmodi und Ablaufdiagrammen. Diese Informationen müssen maschinenlesbar und über einen Anlagenkennzeichenschlüssel verlinkbar sein.

Im Folgenden wird zum einen die Extraktion und Vereinfachung der topologischen Beschreibung der Systeme der technischen Gebäudeausrüstung aus einem IFC Modell, andererseits die Entwicklung einer Ontologie beschrieben. Diese basiert auf den Prinzipien des Semantic Web und integriert sich in die Umgebung innerhalb der Linked Building Data Community Group des W3C.

INTRODUCTION

The building sector is one of the largest energy consumers, using vast amounts of natural resources and releasing significant amounts of greenhouse gases. Scenario based calculations by the German Energy Agency show that to achieve CO₂ savings of 50 up to 75 percent in Germany by 2050, the energy demand of the building sector has to be reduced by around 40 to 55 percent compared to the present state (Hecking et al., 2017).

To implement the energy transition, the digitalisation of the construction sector is a crucial instrument. One focus is the intelligent commissioning and energetic control of the building service systems, which could significantly reduce the energy consumption up to 30% (Katipamula & Brambley, 2005). A major limitation is the absence of an integrated digital representation of the service systems, which is machine-readable and linkable at data level throughout the whole life cycle.

Vast amounts of data are generated and exchanged during the planning, construction and operating phase of building projects. Due to the fragmented structure of the industry and the unique project characteristics, the information supply chain is often established from scratch. Therefore, new data structures are used on a frequent basis, resulting in high amounts of interfaces and, thus, non-standardised processes.

Building Information Management (BIM) is a methodology to provide structured digital information in a machine-readable way. Bew and Richards (Bew & Richards, 2008) proposed a model for the maturity of the BIM implementation within the AEC industry as shown in Figure 1. The current industry maturity is set between levels 0, 1 or 2, depending on the region and the different disciplines - usually the architectural domain is more evolved in comparison to e.g. building automation. In this discipline, data is still manually exchanged with spreadsheets and PDFs and no digital representation exists in the planning phase (VDI 3814-2, 2019; VDI 3814-6, 2008).

To reach BIM Maturity Level 3, data must be exchanged web-based using open standards and decentralised model servers, which allow to link information on a data level from different domains. Currently, Common Data Environments for the web-based information exchange do not cover linking information on this level. A researched approach to cover these requirements is the adaption of Semantic Web and Linked Data technologies (Domingue et al., 2011).

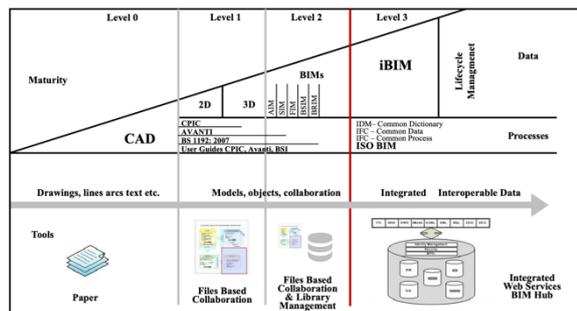


Figure 7: BIM maturity levels (Bew & Richards, 2008)

The project Energie.Digital aims at developing an integrated digital representation of building service systems for the automatic energetic control. The technical characteristics, physical and functional semantics as well as operating states and state diagrams are all linked together using Linked Data and Semantic Web principles and will be available for building managers and technicians in a reference web application. The focus of this paper is set on the extraction of the semantics of service systems from an IFC file and the development of an ontology within the environment of the Linked Building Data Community Group of the W3C (W3C, 2020).

STATE OF THE ART

Building service systems are a central part of the building design to ensure the comfort of the inhabitants as well as the efficient and functional operation of the building (van Treeck et al., 2018). In the design phase the topology and system diagrams are exchanged as planning results within schemes and 3-dimensional building models (Essig, 2017). The open standard for the exchange of building information models is IFC (ISO 16379, 2013), which is based on EXPRESS. Currently, there exists no (applied) open standard to exchange *schemes* of building service systems in a machine-readable way.

There are several attempts using linked data to interconnect the different silos in which data is stored during the process of planning, construction and the operation of a building. While the general concept was suggested as the evolution of the hypertext system of the World Wide Web (Berners-Lee et al., 2001), implementation for the AEC industry has recently gained traction in different areas (Mendes De Farias et al., 2015; Sluijsmans, 2018).

To formalize an ontology supporting the BIM process various efforts have been made, most notably IfcOWL which is an officially endorsed representation of the buildingSMART IFC (Pauwels & Terkaj, 2016; Beetz et al., 2009). IfcOWL has a very broad scope, but due to its inheritance from EXPRESS it is not an ideal base for linked data applications that combine multiple data stores and ontologies. While those try to be concise and focus on their domain of expertise, IFC defines everything internally, starting from units of

measurement to people/organisations, schedules or geometric information. This makes linking items rather complicated, as they first need to define common alignments. Also, it is one of the factors that increase the resulting data sizes not only compared to other linked data graphs but also compared to the EXPRESS notation of IFC.

The Building Topology Ontology (BOT) (Rasmussen et al., 2017) is a new approach, explicitly set as a lean base ontology to define topologic concepts and dependencies within buildings. BOT serves as a central ontology for the W3C Linked Building Data Community Group and is designed to work along other ontologies from the W3C ecosystem. It is accompanied by the Building Products Ontology (BPO), describing (building) products and assembly structures and allowing for various properties (Wagner & Rüppel, 2019) as well as the Ontology for Property Management (OPM) to describe property states and their history, which allow the properties to evolve over time (Rasmussen et al., 2018).

The Semantic Sensor Network Ontology (SSN/SOSA) describing the entities, relations and activities involved in sensing, sampling and actuations in buildings gained rather widespread adoption (Haller et al., 2019). CTRLOnt is another ontology to describe control logic and state diagrams (Schneider et al., 2017). An alignment exists with the SSN/SOSA compatible SEAS ontology which primarily caters to smart energy systems (Lefrançois, 2017).

Other ontologies for semantic modelling in AEC data are using different ecosystems, e.g. SAREF for sensors, IoT and smart devices using M2M communication by the European Telecommunication Standards Institute or the Northern American Brick Schema, which is currently consolidated with the Haystack tagging system as ASHRAE Standard 223P: Building Interoperability with Bricks and Haystacks.

According to the author's research, no lightweight ontology exists to provide a high-level description of building service systems and their topology using linked data principles.

METHOD

The methodology developed for the extraction and transfer of the semantics of building service systems from IFC to a graph based on Semantic Web principles, consist of three steps and is described as follows.

Topology extraction

To exchange information about building service systems, the latest IFC release – IFC 4.1 – supports 59 classes within the Electrical, HVAC, Plumbing and Fire Protection Domain as subclasses of the abstract `IfcDistributionFlowElement` concept to model different building service components. Each class has different `IfcPropertySets` and

predefined types. Within the Control Domain there are seven classes like *IfcSensor* or *IfcActuator* as subclasses of the abstract *IfcDistributionControlElement* class, which can be linked to *IfcDistributionFlowElements*. To describe service systems, these classes can be aggregated within *IfcSystem* and *IfcDistributionSystem*. To describe the physical connections between components, IFC supports the implicit concept of ports with the class *IfcDistributionPort* as shown in Figure 2. The concept further specifies the flow direction (source, sink, sourceandsink, notdefined), the port type (duct, pipe, cable, cablecarrier, userdefined, notdefined) and the associated system. The ports have to be manually modelled within a BIM software to be exported as an IFC class.

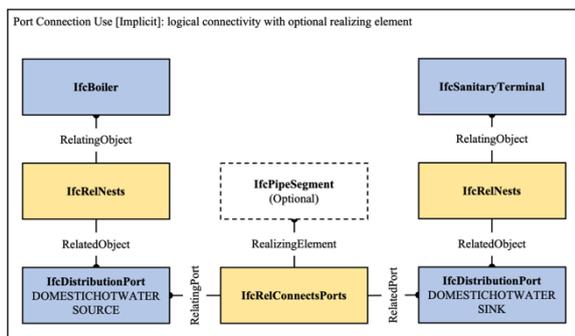


Figure 2: Concept of *IfcDistributionPort* (buildingSMART, 2020)

To export the information about the building service systems and their topology from the IFC model, a framework based on the python modules *ifcopenshell* (Krijnen, 2012) and *networkx* (Hagberg et al., 2008) was developed. In the first step the algorithm iterates over all *IfcDistributionFlowElements*, *IfcDistributionControlElements* and *IfcBuildingElementProxies* and saves them as well as the associated *IfcDistributionPorts*. In the second step, a new directed and undirected graph is created for every system associated with the ports and the building elements are added as nodes in these graphs. In the next step, the algorithm iterates over the ports and creates directed and undirected edges between the associated nodes in the related graph. A colour map is applied to the nodes and edges during this process to differentiate the service systems.

In order to deal with imprecisions in modelling, the geometric position of every port with no connection is analysed. These are tried to match to other free ports within a certain spatial boundary. Elements without an associated port are not further analysed.

Graph Aggregation

To lower the complexity of the exported graph while keeping the same level of information about the topology, an aggregation method was developed and applied using python and *networkx* in the second step.

For the automatic energetic control and an intelligent commissioning of buildings, the necessary Level of Geometry and Level of Information (LoG/LoI) differ between the building elements. A sensor, valve, air terminal or heat pump object needs detailed information and an accurate geometric placement, while a pipe or duct segment usually does not need e.g. precisely modelled gaskets or certain PropertySets. For an explicit description of the topology some of these segments can be aggregated as long as detailed connections are retained.

For each node in the exported graphs, the number of neighbours is computed. The computation is based on undirected graphs. If the number of neighbours is higher than two, the node is considered to be important and is not going to be aggregated. In the other case, the type of the underlying IFC class is checked. If this class belongs to a subclass within the *IfcFlowSegment* or *IfcFlowFitting* concept, the node is considered not to be relevant and can be aggregated. According to this classification, the node and the associated edges are deleted, and a new edge is created to connect the previous neighbours. This edge gets an attribute with the global identification key of the building element, which was represented by the deleted node and the global identification keys which may have been already associated to the deleted edges.

TUBES Ontology

In the last step, the aggregated graph is converted to a Resource Description Framework (RDF) file using the *rdflib* (RDFlib, 2020) python module to link information regarding other domains e.g. building automation and monitoring. Because there exists no lightweight ontology to describe service systems within the W3C environment the TUBES ontology was developed and is further described in the following section.

The scope of the TUBES ontology is to explicitly define the topology of interconnected building service system and their components. As a lightweight ontology it has a strong alignment to other ontologies within the W3C community and aims to provide the means to link information at data level within the AEC industry.

The TUBES ontology consists of 5 classes and 12 object properties. The terms defined in TUBES are identified by Uniform Resource Identifiers (URIs) and use the prefix *tso:*, which is not registered yet.

The ontology consists of the three main classes `tso:Element`, `tso:System` and `tso:Zone`. A `tso:Zone` is a part of the world with a 3D spatial boundary (e.g. space, segment, building) and has an alignment to the `bot:Zone` class. A `tso:Element` is a component with some kind of technical characteristics. It can be any object (e.g. pipe, air terminal, sensor) within the world and has an alignment to the `bot:Element` class. A `tso:System` is an aggregation of `tso:Elements` and defines building service systems (e.g. domestic water, air supply, exhaust air), respective a sub-part or super-part of those, a `tso:System` can have multiple subsystems or supersystems. The structure of the main classes is shown in Figure 3.

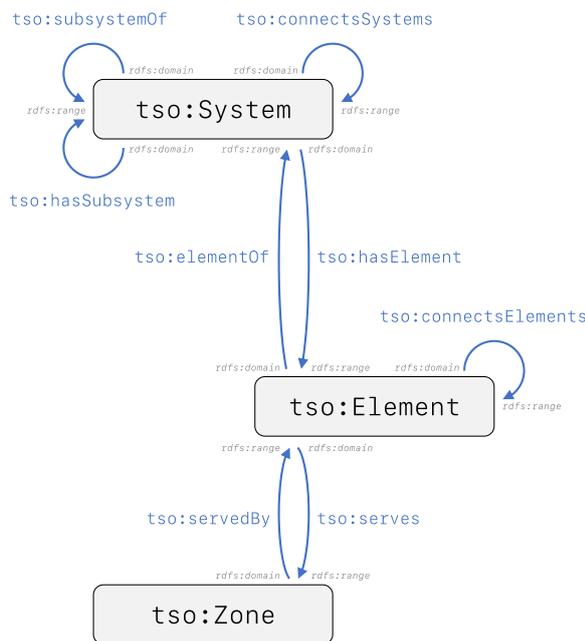


Figure 3: TUBES main class structure

A `tso:Element` has two sub classes, which are defined as `tso:FlowElement` and `tso:ControlElement`. While `tso:FlowElement` describes all elements that contribute to the flow within a system (e.g. pipes, valves, pumps), `tso:ControlElement` defines the components that form a part of the control (e.g. sensor, actuator) and do not contribute to the flow. There are five relationships defined between `tso:Elements`. The `tso:connectsElements` relationship is symmetric and links two `tso:Elements` together. The relationship shall not be used explicitly but is to be inferred from the sub-properties `tso:exchangeFlow` and `tso:exchangeControl`. The properties `tso:supplyFlow` and `tso:flowSuppliedBy` are inverse and define the directed flow between two `tso:FlowElements` as sub-properties of `tso:exchangeFlow` – as illustrated in Figure 4. These relationships shall solely be used if the direction of the flow between two `tso:FlowElement` can be defined explicit. If the direction may vary the connection shall be defined on the level of `tso:exchangeFlow`.

The `tso:Zone` class is connected to `tso:Element` by the inverse relationship `tso:serves` and `tso:servedBy` to define the spatial connection between those two concepts.

The class `tso:System` is linked to `tso:Element` by the inverse relationship `tso:hasElement` and `tso:elementOf`. These properties define the affiliation of components to building service systems, where one component can be linked to more than one system. To take the hierarchical order of systems into consideration, `tso:System` can be linked as a subsystem to another `tso:System`, which can have multiple supersystems as well. This is applied by the use of the inverse relationship `tso:hasSubsystem` and `tso:subsystemOf`. The symmetric relationship `tso:connectsSystems` defines the interaction between different systems.

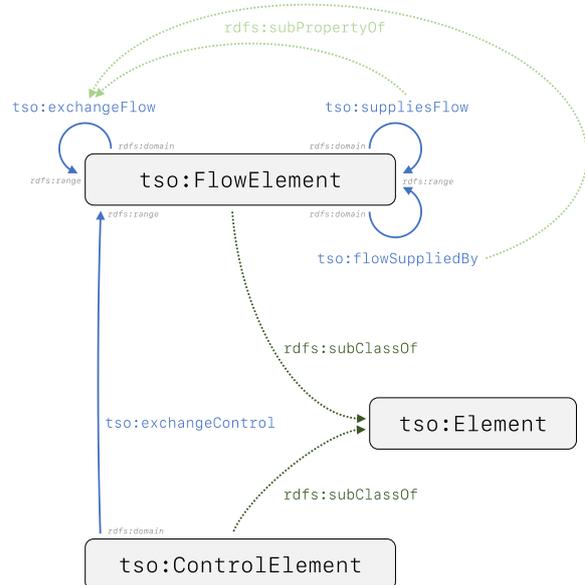


Figure 4: TUBES flow system

TUBES has a strong alignment to other ontologies like BOT or IfcOWL for the classification of different building elements. The concepts `bot:Element` and `ifc:IfcElement` can be directly linked to the `tso:Element` class, as well as `ifc:IfcDistributionFlowElement` and `ifc:IfcDistributionControlElement` from `tso:FlowElement` and `tso:ControlElement`. This also applies to the `bot:Zone` concept, which can be linked to the `tso:Zone` class accordingly.

APPLICATION EXAMPLE

The described methodology is tested on a part of the ventilation system of a laboratory building at Fraunhofer ISE in Freiburg. Based on the existing scheme, a geometric representation was modelled using Revit. The model includes an air handling unit, the necessary pipe and duct components as well as the sensors and their alphanumeric information. As stated

in the previous section, a high LoG/LoI was required. For the unique identification of the components, a global identification key was applied in a semi-automatic process. The ventilation system is shown in Figure 5.

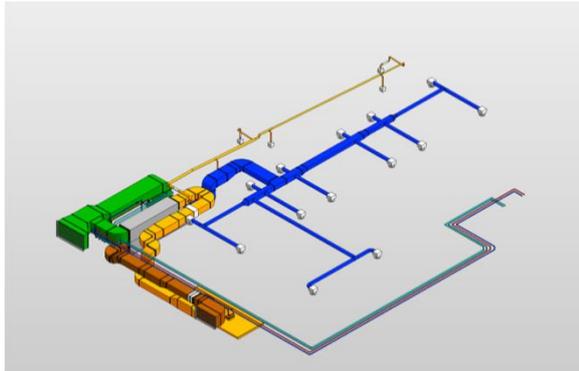


Figure 5: 3D view of the ventilation system

Furthermore, the model was exported using the build-in export function in Revit 2019 to an IFC model using the IFC4.1 Design Transfer View definition. It consists of 422 building elements, which are represented by different IFC classes detailed in Table 1. The air handling unit was exported as an `IfcBuildingElementProxy`, because there exists no associated classification within the IFC scheme.

Table 1: Building elements in the IFC model

Amount	IfcClass
100	IfcPipeSegment
80	IfcPipeFitting
96	IfcDuctSegment
87	IfcDuctFitting
5	IfcValve
1	IfcPump
2	IfcFlowMeter
22	IfcAirTerminal
13	IfcSensor
16	IfcBuildingElementProxy
422	Total

RESULTS

The graph resulting from the topology extraction consists of 422 nodes and 393 edges. All building elements given in Table and their connections were correctly exported. Five of those elements within the class `IfcBuildingElementProxy` have no port. Therefore, they are not connected to any other element and do not have a system associated. The other 417 components which are represented by the nodes can be classified into eight different systems. The graph is illustrated in Figure 5.

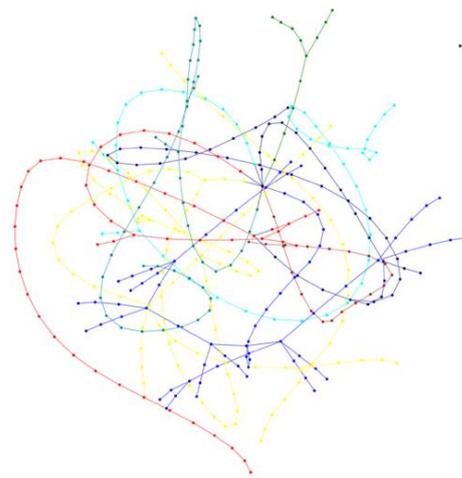


Figure 6: Exported Graph

In the second step the graph was aggregated. The total amount of nodes could be reduced from 422 to 83. The amount of edges was reduced from 393 to 76, while keeping the same level of topological information. This corresponds to a reduction of the complexity by approximately 80%. The resulting graph is illustrated in Figure 6. The differences between the computed graph and the aggregation are further detailed in Table 2.

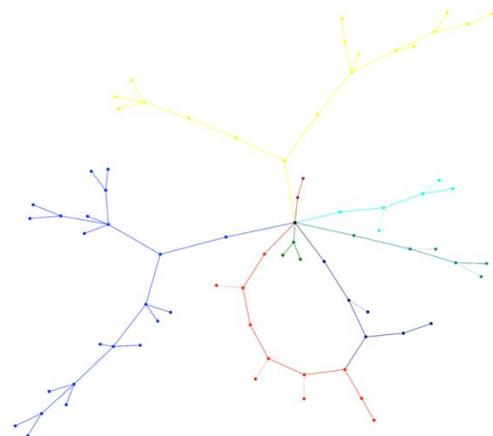


Figure 7: Aggregated Graph

Table 2: Results of the aggregation

IfcClass	Graph	agg. Graph
IfcPipeSegment	100	4
IfcPipeFitting	80	9
IfcDuctSegment	96	12
IfcDuctFitting	87	6
IfcValve	5	5
IfcPump	1	1
IfcFlowMeter	2	2
IfcAirTerminal	22	22
IfcSensor	13	13
IfcBuildingElementProxy	16	11
Total nodes	422	85
Total edges	393	76

CONCLUSION AND OUTLOOK

This paper presented a methodology to extract the semantics of building service systems out of an IFC4.1 model into a graph based on semantic web principles. To facilitate this, a lightweight ontology was designed, aligned within the W3C Linked Building Data Community Group for an integrated digital representation of those systems.

The methodology consists of three steps. At first the topology is extracted and saved as a graph. In the second step the graph is aggregated, while keeping the same level of topological information and the different systems are visualized. In the third step the aggregated graph is converted into an RDF file, which is compliant with the presented ontology. Within the Energie.Digital project this representation will be further developed by linking real life monitoring data as well as state diagrams and functions, which are modelled using an IEC 61131-3 (IEC 61131-3, 2012) standardized programming language for an automatic energetic control of buildings. The real benefit of this methodology will be further evaluated on a building project, which is already in construction in Germany.

Areas for further extensions and improvements include the detailed analysis of geometric connections in IFC, which are modelled without the use of distribution ports, and possible spatial algorithms to extract these. Another area is the extension of the presented ontology by a classification scheme based on the VDI 2552-9 (VDI 2552-9, 2020) and the analysis of different types of systems as well as the application of the methodology on a larger scale project. Furthermore, the ontology needs to be revised and further researched.

ACKNOWLEDGMENTS

The research within the project Energie.Digital leading to these results has received funding from the German Ministry for Industry and Energy under grant agreement no. 03ET1611. The authors would like to thank the Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE and Viega Holding GmbH & Co. KG for their contribution to the project.

DANKSAGUNG

Dieser Beitrag wurde im Rahmen des vom BMWi geförderten Projektes Energie.Digital (FKZ: 03ET1611) verfasst. Die Autoren danken dem Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE und Viega Holding GmbH & Co. KG für deren Arbeit im Projekt.

REFERENCES

- Beetz, J., van Leeuwen, J., & de Vries, B. 2009. IfcOWL: A case of transforming EXPRESS schemas into ontologies. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 23, 89-101.
- Berners-Lee, T., Hendler, J., & Lassila, O. 2001. *Computing: The Semantic Web*. Scientific American, 284, 34-43.
- Bew, M., & Richards, M. 2008. Bew-Richards BIM maturity model. buildingSMART Construct IT Autumn Members Meeting.
- buildingSMART. 2020. IFC 4.1 Specification. https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4_1/FINAL/HTML/.
- Domingue, J., Fensel, D., & Hendler, J. A. 2011. *Handbook of semantic web technologies*. Springer.
- Essig, B. 2017. BIM und TGA: Engineering und Dokumentation der Technischen Gebäudeausrüstung. DIN.
- Hagberg, A. A., Schult, D. A., & Swart, P. J. 2008. Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX. *Proceedings of the 7th Python in Science Conference (SciPy2008)*, (S. 11-15). Pasadena.
- Haller, A., Janowicz, K., Cox, S. J., Lefrançois, M., Taylor, K., Le Phuoc, D., Stadler, C. 2019. The modular SSN ontology: A joint W3C and OGC standard specifying the semantics of sensors, observations, sampling, and actuation. *Semantic Web*, 10, 9-32.
- Hecking, H., Hennes, O., Elberg, C., Oschatz, B. 2017. Szenarien für eine marktwirtschaftliche Klima- und Ressourcenschutzpolitik 2050 im Gebäudesektor. German Energy Agency.

- IEC 61131-3. 2012. Industrial control programming standard advancements. International Society of Automation.
- ISO 16379. 2013. Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries. International Organisation for Standardisation.
- Katipamula, S., & Brambley, M. 2005. Methods for Fault Detection, Diagnostics, and Prognostics for Building Systems — A Review, Part I. HVAC&R, 11.
- Krijnen, T. 2012. An open source IFC-geometry engine.
- Lefrançois, M. 2017. Planned ETSI SAREF Extensions based on the W3C&OGC SOSA/SSN-compatible SEAS Ontology Patterns. Proceedings of Workshop on Semantic Interoperability and Standardization in the IoT (SIS-IoT). Amsterdam.
- Mendes De Farias, T., Roxin, A., & Nicolle, C. 2015. Semantic Web Technologies for Implementing Cost-effective and Interoperable Building Information Modeling. The 14th International Conference on Informatics in Economy (IE 2015). Bucharest.
- Pauwels, P., & Terkaj, W. 2016. EXPRESS to OWL for construction industry: Towards a recommendable and usable ifcOWL ontology. Automation in Construction, 63, 100-133.
- Rasmussen, M. H., Lefrançois, M., Bonduel, M., Hviid, C. A., & Karlshøj, J. 2018. OPM: An ontology for describing properties that evolve over time. Proceedings of the 6th Linked Data in Architecture and Construction Workshop, 2159, S. 4197–4203. London.
- Rasmussen, M. H., Pauwels, P., Hviid, C. A., & Karlshøj, J. 2017. Proposing a central AEC ontology that allows for domain specific extensions. Proceedings of the Joint Conference on Computing in Construction (JC3), 1, S. 237–244. Heraklion.
- RDFlib. 2020. RDFlib python module. <https://github.com/RDFLib/rdfliib>
- Schneider, G. F., Pauwels, P., & Steiger, S. 2017. Ontology-based modeling of control logic in building automation systems. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 13, 3350–3360.
- Sluijsmans, S. J. 2018. Linked Data in the AEC: a case-study on the application of Linked Data for Cost Control. Linked Data in the AEC: a case-study on the application of Linked Data for Cost Control.
- van Treeck, C. A., Kistemann, T., Schauer, C., Herkel, S., & Elixmann, R. 2018. Gebäudetechnik als Strukturgeber für Bau- und Betriebsprozesse: Trinkwassergüte - Energieeffizienz - Digitalisierung. Springer Vieweg.
- VDI 2552-9. 2020. Building Information Modeling: Klassifikationen. The Association of German Engineers. Beuth Verlag.
- VDI 3814-2. 2019. Building automation and control systems (BACS) - Planning - Planning content, system integration, and interfaces. The Association of German Engineers. Beuth Verlag.
- VDI 3814-6. 2008. Building automation and control systems (BACS) - Graphical description of logic control tasks. The Association of German Engineers. Beuth Verlag.
- W3C. 2020. Linked Building Data Community Group. <https://www.w3.org/community/lbd/>.
- Wagner, A., & Rüppel, U. 2019. BPO: The Building Product Ontology for Assembled Products. Proceedings of the 7th Linked Data in Architecture and Construction Workshop, (S. 106–119). Lisbon.

METATGA: A CHANCE FOR BIM IN THE FIELD OF MEP

S. Hauer¹, J. Murschetz², A. Bres¹, A. Sporr¹, M. Schöny¹ and M. Monsberger²

¹Austrian Institute of Technology GmbH, Center for Energy, Thermal Energy Systems,
Vienna, Austria

²Graz University of Technology, Institute of Building Construction, Graz, Austria

ABSTRACT

The use of Building Information Modeling (BIM) is becoming more and more state-of-the-art in the construction and real estate industries. Mechanical, electrical, and plumbing (MEP) has a major part in this field. The quality of MEP in the planning and the construction phase of a building is crucial for energy consumption and human comfort within the building. To benefit from the advantages of the BIM methodology, a high-quality data model is needed to ensure the availability of necessary information of a complete life cycle of a building. The Austrian research project metaTGA provides solutions for high-quality data models. The paper will provide information about: how do MEP openBIM data models need to look like? What are the major development steps of this models? How they are applied in a BIM project including first practical feedback? How does the process support quality measures for BIM projects?

INTRODUCTION

The use of Building Information Modeling (BIM) represents a fundamental technological leap in the construction and real estate industries and has medium- to long-term implications for all stakeholders in the value chain of the construction sector. Mechanical, electrical, and plumbing (MEP) has a major part in this field. The quality of MEP planning and coordination is one of the central and most resource-intensive tasks in the construction process and it is crucial for energy consumption and human comfort within the building (Boktor et al., 2014; Wang and Leite, 2016). Studies show that open data interfaces such as Industry Foundation Classes (IFC) and interoperability between software environments are of great importance, especially in the area of MEP (Both et al., 2013; Kovacic et al., 2013). Uniform data models and modeling standards are important pre-requisites for open data exchange via openBIM. openBIM is a universal approach to the collaborative design, realization and operation of buildings based on open standards and workflows (buildingSMART-International, 2014). Current activities at national and international level are trying

to further advance and establish openBIM. At the level of buildingSMART International¹, the International Property Server *buildingSMART Data Dictionary*² (bsDD), its Framework of Dictionaries (IFD) and the specifications of IFC4.3 are currently under development, which can be found at the international level in the current ISO 16739 standard (IFC) and the existing ISO 12006 standard (IFD). This activity is supported by the upcoming ISO 23386 standard (methodology for the description, creation and maintenance of properties in interconnected data catalogs), which also includes the necessary link to the international property server (bsDD/IFD). ISO 19650-Part 1/2/3 and the planned extensions Part 4/5/6 (information exchange, security-minded approach to information management) are the basis for project-related (PIM) and company-related (AIM) data management. The requirements of ISO 23386 and ISO 19650 are essential and will therefore be adopted in the upcoming CEN TC442 EU BIM standard. The results from the CEN TC442 subsequently lead to national standards such as ÖN A6241-2: 20XX and will have a significant impact on the practical project organization. buildingSMART International works continuously on the IFC standard, which in the long term will also include the complete data structure for transport infrastructure within IFC 5 and will subsequently result in the next update of the ISO 16739 standard (Eichler, 2020).

Nevertheless, the current development stage especially of MEP BIM models shows that a comprehensive and consistent usage in different BIM applications is currently limited. Mainly because of information losses within MEP models using the openBIM approach, re-modeling is often part of reality (Castell-Codesal, Javier and Frantzen, Jürgen, 2015). On the one hand, one of the main reasons is, that current available standards for openBIM MEP models are not sufficient in terms of available information about which parameters need to be specified and provided (Hauer et al., 2019). Initiatives like bimobject³, MEPcontent⁴, BIM&CO⁵, NBS National BIM Library⁶ etc. provide online platforms and several plug-ins to facilitate pre-defined BIM objects from various manufacturers for BIM projects.

¹ <https://www.buildingsmart.org>

² <http://bsdd.buildingsmart.org>

³ <https://www.bimobject.com/en/product>

⁴ <https://www.mepcontent.com/en/>

⁵ <https://www.bimandco.com/de>

⁶ www.nationalbimlibrary.com/en/

Manufacturers can use these platforms for publishing their products as BIM models for further use. Mostly the models can be downloaded in various formats e.g. *.rvt*, *.dwg*, *.ifc*, *.dxf*, etc. In the authors opinion the main problem lies in the different quality of the properties, which depend on the respective manufacturer. Critical spoken, in terms of geometry- and basic information, the models are good to be used in the design phase of a building, but in terms of technical properties necessary for MEP design, the content of the models show that they can not be used for this purpose.

buildup Schweiz⁷ tries to close these gaps although they also depend on manufacturer information. In the authors opinion, the platform offers more technical properties compared to the others. Buildup offers a neutral structure of technical information provided by manufacturers, which allows BIM modelers to search, filter and compare based on properties. For a better connection customers can use an open API for further use. Moreover, additional technical information e.g. manuals, data sheets and in many cases generic ifc-files, which contain all information in IFC language, are available for customers (buildup, n.d.).

On the other hand, the import/export functionality of state-of-the-art BIM applications need to be improved as well, because often they cause errors in openBIM MEP models. Based on stakeholder feedback from the building domain, (Hauer et al., 2018a) confirms, that missing parameters in IFC especially in MEP represent one of the biggest obstacles for a continuous use of the openBIM approach. The Austrian research project metaTGA⁸ deals exactly with those challenges and provides solutions avoiding such situations. Based on the results of the project, the paper investigates following questions: how do MEP openBIM data models need to look like? What are the major development steps of this models? How they are applied in a BIM project including first practical feedback? How does the process support quality measures for BIM projects?

METHODOLOGY

Developed processes

The first step in the development process was to generate high-quality metadata (chapter data harvesting) as a basis for all upcoming developments. The second step (chapter data processing) was to process the data in terms of usability, practical use and structuring the parameters, to be able to finally specify MEP models. Finally, a practical example of how these models can be applied in BIM based MEP planning is introduced in chapter data usage.

MEP BIM model requirements

To ensure a strong practical relevance of the developed solution of the research project metaTGA, an intense stakeholder involvement from the building industry was established (see *Figure- step1*). Hence, feedback (based on interviews, workshops and classical desk research) from real BIM projects and consequently of the BIM real-world problems were collected and investigated. Among others, the following challenges have been identified (Hauer et al., 2018b):

- the reusability of IFC models or in other words an error-free transfer between different software environments is often not possible. Mostly due to missing attributes in the IFC structure or based on insufficient export capability.
- BIM models from manufacturers are often too detailed in terms of geometrical information. On the other hand, mandatory metadata is often missing. The provided models should be made more manageable and have an adequate storage size by e.g., simplifying the geometry.
- New parameters should be specified uniquely and correctly, that there is no room for interpretation. Currently this is not guaranteed due to e.g. translation errors between different languages.

Further requests from the metaTGA stakeholder feedback for MEP models were, e.g.:

- the developed models, in particular the specified attributes and metadata, should have a strong practical relevance and should consider the entire life cycle of a building, especially planning and operation.
- the developed models should be validated by experts to guarantee a strong practical use.

To meet above requirements an universal concept was developed introduced by (Hauer et al., 2019). This concept was further developed within the scope of the project metaTGA and will be described in the following sections.

Data harvesting

For each MEP component to be developed e.g. heat pump, different sources of information (e.g. individual sheets from VDI-3805, manufacturing data sheets, IFC4 Add2TC1, Austrian standardized specification for building services (in German language: Standardisierte Leistungsbeschreibung Haustechnik⁹), experience values from HVAC experts, etc.) were analysed in detail, resulting in parameter lists of available metadata.

⁷ <https://ch.buildup.group>

⁸ www.metatga.org

⁹ <https://www.bmdw.gv.at/KulturellesErbe/Bauservice/Seiten/LB-Haustechnik.aspx>

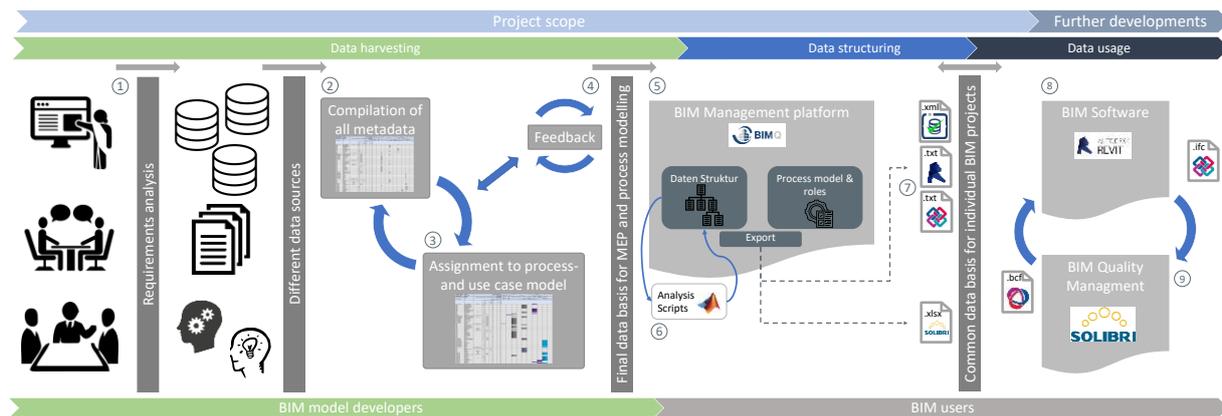


Figure 1: Process overview of the metaTGA approach of developing MEP BIM models

These parameters were investigated for their practical relevance, reduced to the essential ones and extended with corresponding SI-Units (Figure 1- step 1-2). Next step (Figure 1- step 3) was to investigate which data out of this set of metadata, is needed from whom and when, for BIM to be able to deliver its benefits over the entire building life cycle. Therefore, all necessary metadata were associated to different involved stakeholders (e.g. client, architect, technical sub-domain planner, facility manager, etc.) and building life cycle phases according to the Austrian Standard ÖNORM A 6241 Part 2- Appendix B¹⁰ and the Austrian scale of fee structures for architects and engineers (in German language: Leistungsmodell-Technische Ausrüstung LM.TA- 2014¹¹). As side effect, the results can be further used for process models e.g. sizing of HVAC components, using standardized languages like business process model and notation (BPMN). To ensure practical relevance of the developed results, a cross-check by experts was performed on a regular basis (see Figure 1- step 4).

Data processing and structuring

After the definition of mandatory metadata and their responsible technician (e.g. technical sub-domain planner, architect, facility manager, etc.) for different MEP components, these definitions must be transferred into a BIM collaboration and management platform which enables different users to apply them according to their role in a BIM project with different BIM applications. The collaboration software BIMQ¹² was chosen for this purpose.

The features of BIMQ perfectly match the requirements of the metaTGA project and support the idea of the openBIM approach (see Figure 1- step 5). Additionally to other features, BIMQ offers the possibility to define individual roles, meaning responsible persons, project phases and use cases (see further information e.g. Baldwin et al., 2019, p. 180; Liebich, 2018; Wirz and Frey, 2019). This means with

BIMQ one of the main requirements – specify which parameters are needed (and when) to fully describe a MEP component over the entire building life cycle phases – can be fulfilled using BIMQ. From a project point of view, among others BIMQ interacts as kind of an individual or company specific “property server” for MEP BIM model definitions. From a management point of view in the role of a MEP planner, BIMQ allows both to define Level of Information (LOI) requirements as parts of employer information requests (EIRs) (in German: Auftraggeber- Informations-Anforderung (AIA)) or apply them for BIM projects. In order to ensure that EIRs and BIM models meet the quality standards, BIMQ offers export files for model checking software such as Solibri Model checker (SMC)¹³ or simplebim¹⁴, which can be used to automatically check whether the requirements have been met. Thus, it can be guaranteed that every involved technician within a BIM project has the same MEP model standards especially in terms of model quality and clear responsibilities (same number of parameters, unique responsibility of parameters to be defined in different project phases, etc.). One challenge of the definition process was, that every parameter of all MEP models to be specified, must not exist more than once in the system. This means a parameter for e.g. pressure drop, can be defined only once in BIMQ but can be assigned to other MEP components if necessary. For a few MEP components, this can be done of course manually, but during the metaTGA project 56 MEP components for heating and mechanical ventilation (from categories generation, distribution and delivery like: heat pumps, air handling units, valves, pipes, fittings, actuators, etc.) have been defined resulting in ~840 individual parameters. Therefore, analysis scripts in MATLAB were developed supporting the following necessary

¹⁰ https://shop.austrian-standards.at/action/en/public/details/514168/OENORM_A_6241-2_2015_03_15

¹¹ https://www.ingenieurbueros.at/media/Kwc_Basic_Download_Tag_Component/161-4730-5986-downloadTag/default/903380cc/1496768149/technische-ausruestung.pdf

¹² <https://bim-plattform.com/de/bimq/>

¹³ <https://www.graphisoft.at/solibri/>

¹⁴ <https://simplebim.com>

tasks to have a good data structure for each MEP model (see Figure 1- step 6): In the first step, all data from different MEP components were combined and sorted. The data were automatically investigated in terms of typical typing errors and similar meanings but different names. Errors were corrected automatically with the help of histograms to increase the number of similar parameters. These corrected parameters were checked for similarities between them in order to allow unifying. After the unifying process, the parameters were checked for grouping them in similar categories for an easier implementation into BIMQ. According to the 56 MEP models, following main categories were specified: general parameters, domain heating and ventilation, and each of them were additionally subdivided into generation, distribution and delivery. As practical example parameters like AKS number (in German: “Anlagenkennzeichnungs-system”), warranty period, warranty terms were grouped into the category “general_properties _metatga”, parameters like type of air, pressure drop and air flowrate range were assigned to the category “general_ventilation_properties _metatga”. One of the most important steps in this definition phase was the assignment of each MEP component and their parameters to the corresponding (if available) IFC4 entity and properties. This is crucial because this

guarantees a functional openBIM approach using IFC as collaboration format. Unfortunately, due to a lack of IFC properties – especially in the field of MEP – this mapping was not easy to fulfil. Only ~20% of all unique parameters could be mapped to IFC properties directly. Therefore user-defined property sets, so called “M-sets”, were specified in order to transfer all necessary parameters within an IFC file. Finally, after all definition steps in BIMQ were done, the platform is ready to export the results in the corresponding BIM application (see Figure 1- step 7). Depending on the chosen software for MEP modeling (currently available for Revit, Allplan, ArchiCAD, ProVi) or model checking, the export type of files varies between simple text (specifically formatted), mvdXML¹⁵ or xls/x.csv. For the actual project setting, this means a .txt Revit mapping file for IFC, a .txt and .xml Revit import file and a .xlsx model checking file.

Data usage

After the sets of metadata for MEP components were structured by using the data management platform BIMQ, all participants within a collaborative BIM project are “compelled” to use them according to their responsibilities and roles along the whole project life cycle. This guarantees clear responsibilities and a high quality in the MEP planning process.

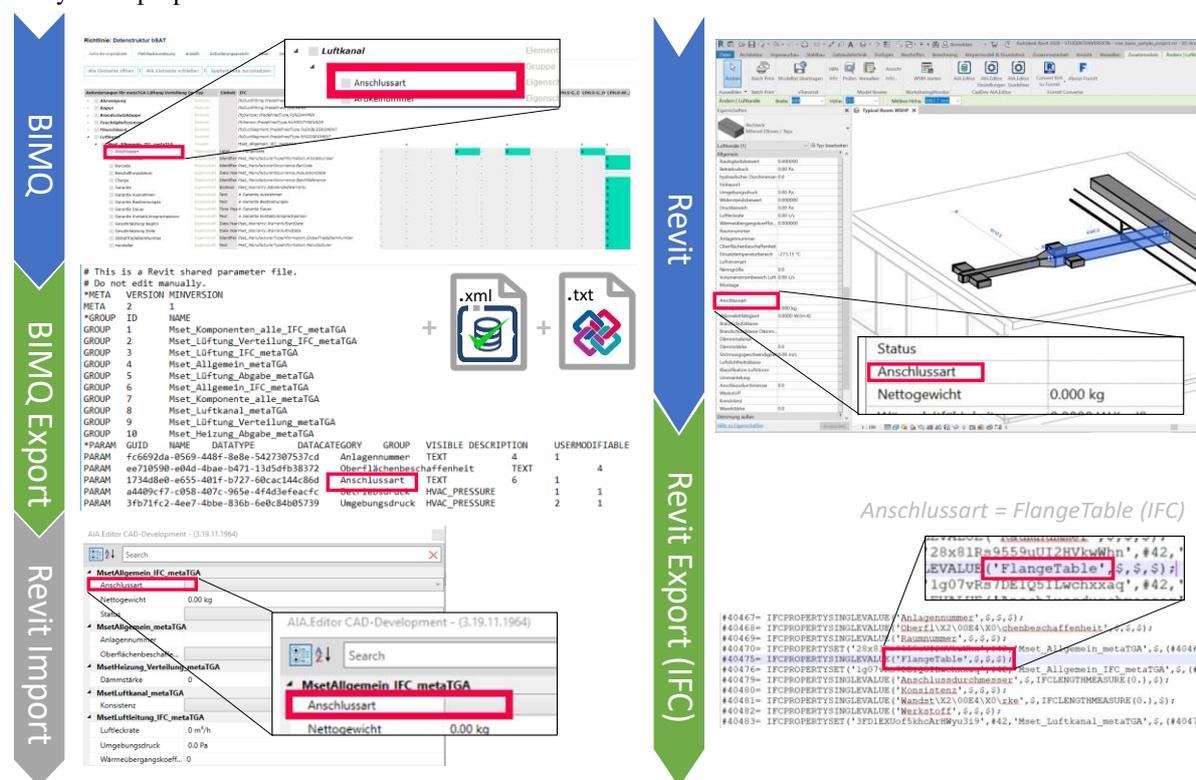


Figure 2: Example of data transfer (from left to right and from top to bottom) from BIMQ (upper left) into the authoring Software Autodesk Revit (upper right) and the export as IFC file (lower right) for the parameter connection type (in German: Anschlussart) of a duct segment

¹⁵ <https://technical.buildingsmart.org/standards/mvd/mvdxml/>

To finally enable the use of these MEP components in the planning process of a building, each component can be transferred depending on their project phase into the chosen BIM software and model checking software (see Figure 1- step 7/8). Figure 2 shows the export steps in more detail, focusing on the parameter connection type (in German: Anschlussart) of a duct segment. BIMQ exports two Revit-readable *.txt*-files including the mapping information for IFC and Revit (how they appear in Revit after import for further use) and one *.xml*-file for the following add-on. With the support of the RVT.AIAEditor¹⁶ the parameters can be easily imported and mapped correctly to the Revit structure. After the successful import in Revit, the parameters can be parametrized as always. Based on the openBIM approach, Revit can now export an *.ifc*-file for further use (e.g. model checking or combining IFC sub-models to an overall model). From a practical point of view, planning processes are iterative, thus model checking against metadata-requirements should be executed in each planning phase of the building (Figure 1- step 8 and 9). That's why this transfer process will be repeated in every stage of the planning process as new parameters must be defined due to the increasing level of detail (LOD) of the model. With a model-checking software like Solibri Model checker each transfer process, respectively the question "was each parameter specified correctly and completely in the corresponding planning phase", can be verified with these tools semi-automatically. For that, SMC imports both the *.ifc*-file (Revit) and the automatically created *.xlsx*-file (BIMQ) to perform the quality check of the model (Figure 1- step 9).

FINDINGS AND FUTURE WORK

The developed processes from Figure 1 were applied in reality, defining the main components which enable modelling heating- and ventilation systems with focus on renewable energy sources. First impressions and practical feedback will be described below:

- The effort to get to all relevant parameters and the definition when and from whom these parameters for a MEP component need to be specified, is immense (in terms of time and relevant information sources) and should not be underestimated for new MEP components.
- Coming from a pool of parameters of different MEP components, the grouping of the parameters to similar datasets is quite a challenge in BIMQ. Moreover, the requirement that each parameter in BIMQ must not exist more than once in the system, is a challenge for itself under the circumstance using BIMQ not from the beginning in the model development process. Avoiding such situations BIMQ would have to be involved early in the design phase of the metaTGA process or in general for BIM projects. Nevertheless, methods of analysing parameters in terms of uniqueness, grouping and assignment

to MEP components, need to be developed further: not only for creating a set of metadata from scratch, but also for merging earlier developed or foreign metadata together.

- In order to obtain conclusive datasets for MEP components, it is necessary to compare and assimilate datasets of similar MEP components e.g. pipe and pipe bend. Both components are very similar in function, therefore the datasets should be similar by means of parameters, life cycle information and responsibility for parameters too.
- In order to facilitate a collaborative work with different project participants, an IFC export from BIMQ is essential for an openBIM approach. To get a reliable IFC-export of the model, it is necessary to assign all parameters to IFC-properties. The information which parameter complies with which IFC-property is also a part of the definition in BIMQ. An export enables now a correct usage in the chosen BIM software (modelling or checking). Again, the effort doing that should not be underestimated, since an assignment to an existing IFC parameter is not always clear. The BIMQ designer must know in advance which IFC parameter is in which IFC property set in order to map attributes correctly. This requires a basic knowledge about IFC and its data structure. Language barriers between e.g. English and German and in some cases, the not comprehensible data structure of IFC (where to find parameters from property sets) will increase the effort further.
- The transfer of metadata from BIMQ to MEP-models is also very time consuming (it depends on the used BIM modelling software). Revit without any add-ons for example enables to pick only one attribute at a time. To reduce the effort in terms of time of this migration process, which has to be done for each component in each stage of the planning process, applications like RVT.AIA-Editor should be used.
- The result of the metaTGA process, especially the process model and the unique responsibility of MEP parameters depending on the building life cycle (project phase) increases the planning quality and reducing the effort (time) of coordination between different BIM project participants.

When viewed critically, some processes were described as time-consuming. However, it should be mentioned that these processes usually only have to be done once, namely when defining the model itself. Due to the selected software settings, all models can be used straight away for various BIM projects. The effort of the first implementation should therefore be correctly assessed or not underestimated. However, once these tasks have been completed, the user will

¹⁶ <https://cad-development.de/bimloesungen/unsere-bim-loesungen/rvtaiaeditor/>

gain a lot of benefits during his work, which means the described approach is expedient. The metaTGA project finally managed to create manufacturer-neutral MEP models (for heating and mechanical ventilation) that can be used generically in BIM projects.

In summary, the introduced processes and methods have the potential to increase quality of a BIM project. Using tools like BIMQ, SMC, Revit, etc. in combination with the metaTGA processes, quality measures can be applied almost automatically for every planning phase of a building. Furthermore, the developed MEP models and their mapping to IFC increase the interoperability within BIM projects.

As future work, within the research project metaTGA a final test supporting planning processes of a “real world” project will be done. Feedback from different planning teams will be collected, analysed and if necessary, the metaTGA processes and models will be adapted before they will be finally published.

ACKNOWLEDGEMENT

The work of this paper was created in the course of the project metaTGA (FFG 861729) and promoted in the program line “Stadt der Zukunft” (4th call). “Stadt der Zukunft” is a research and technology program of the Federal Ministry of Transport, Innovation and Technology. It is handled on behalf of the BMVIT by the Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft together with Austria Wirtschaftsservice Gesellschaft mbH and the Österreichischen Gesellschaft für Umwelt und Technik (ÖGUT).

REFERENCES

- Baldwin, M., V, D.I.N., GmbH, M.M.D., 2019. Der BIM-Manager: Praktische Anleitung für das BIM-Projektmanagement, Beuth Innovation. Beuth Verlag GmbH.
- Boktor, J., Hanna, A., C. Menassa, C., 2014. State of Practice of Building Information Modeling in the Mechanical Construction Industry. *Journal of Management in Engineering* 30, 78–85.
- Both, P. von, Koch, V., Kindsvater, A., 2013. BIM - Potentiale, Hemmnisse und Handlungsplan: Analyse der Potentiale und Hemmnisse bei der Umsetzung der integrierten Planungsmethodik Building Information Modeling - BIM - in der deutschen Baubranche und Ableitung eines Handlungsplanes zur Verbesserung der Wettbewerbssituation, Forschungsinitiative ZukunftBau F. Fraunhofer-IRB-Verl, Stuttgart.
- buildingSMART-International, 2014. Technical Vision [WWW Document]. Standards. URL <https://www.buildingsmart.org/standards/technical-vision/> (accessed 1.30.19).
- buildup, n.d. buildup Schweiz [WWW Document]. URL <https://ch.buildup.group/static/info/features> (accessed 6.23.20).
- Castell-Codesal, Javier, Frantzen, Jürgen, 2015. Anforderungen an Produktdaten in der Gebäudetechnik.
- Eichler, C., 2020. Overall architecture.
- Hauer, S., Bres, A., Partl, R., Monsberger, M., 2019. An approach for the extension of openBIM MEP models with metadata focusing on different use cases, in: *Building Simulation 2019*. Presented at the Building Simulation 2019, Rom.
- Hauer, S., Bres, A., Partl, R., Monsberger, M., 2018a. Einblick in das Forschungsprojekt Metadaten und Prozessmodelle für Open BIM in der TGA (metaTGA). Presented at the enova-internationale Conference, Zukunft der Gebäude?, pp. 253–259.
- Hauer, S., Bres, A., Petrushevski, F., Monsberger, M., Fortmüller, P., Partl, R., Eichler, C., Urschler, C., Brandauer, G., 2018b. Deliverable 2.1-Anforderungskatalog für die Entwicklung der TGA-Daten- und Prozessmodelle (internes Deliverable). Wien.
- Kovacic, I., Oberwinter, L., Müller, C., Achammer, C., 2013. The “BIM-sustain” experiment – simulation of BIM-supported multi-disciplinary design. *Visualization in Engineering* 1, 13. <https://doi.org/10.1186/2213-7459-1-13>
- Liebich, T., 2018. Prüfbare Informationsanforderungen aufstellen und im Projekt umsetzen - Informationsmanagement mit BIMQ.
- Wang, L., Leite, F., 2016. Formalized knowledge representation for spatial conflict coordination of mechanical, electrical and plumbing (MEP) systems in new building projects. *Automation in Construction* 64, 20–26. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.12.020>
- Wirz, A., Frey, M., 2019. Zusammenarbeit mit der BIM-Methode Erfahrung aus der Praxis.

A HYBRID METHOD FOR AN INTEGRAL FUNCTION DESCRIPTION OF BUILDING SERVICES

M. Ihlenburg¹, T. Rist¹, G. Angelika Benndorf¹, N. Réhault¹

¹Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, Germany

ABSTRACT

Automation systems have been becoming ubiquitous in modern buildings. Despite the benefits they can bring in terms of productivity, energy efficiency and comfort improvements, they often lack interoperable descriptions of the basis functions of the systems they control, for instance Heating, Ventilation and Air Conditioning systems (HVAC). This situation hinders the implementation of methods aiming at automatizing the commissioning and the supervision of the operation of building services and thus enabling a better energy performance of buildings. In an attempt to address this issue, we propose a hybrid approach for the digital description of control functions in Building Automation and Control Systems (BACS), combining the features of existing ontologies and of a global standard for industrial control programming.

INTRODUCTION

The automation level of buildings has not stopped growing over the last decades and regulatory drivers, for instance the new Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) in Europe, might boost the adoption of digital driven technologies such as Building Automation and Control Systems (BACS), especially in non-residential buildings (Global Energy and Environment Research Team at Frost & Sullivan, 2019).

In buildings, BACS autonomously control and monitor a wide range of services including Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) systems, which account for approximately 40% of the total building energy consumption (Bosseboeuf, 2015). During the operation phase of buildings, BACS aim at continuously controlling and monitoring the energy operation of HVAC systems. However, in many cases, the energy performance of buildings lies far below the designed targets. One of the reasons for this low performance is the frequent presence of faults and malfunctions in the operation of HVAC systems. In many cases, these faults lead to energy wastes, comfort violations for users and premature wear of components.

Whereas new BACS integrate fault detection and analytics functions, legacy BACS can hardly help identifying these issues. Furthermore, tracking a possible fault today requires considerable efforts as well as an understanding of the underlying control functions of an HVAC system. Most of these functions

are implemented at the automation level of BACS in e.g. programmable logic controllers (PLC). Currently, in most of the buildings, information on these functions are either not available or not updated. If available, they are not provided in an interoperable format enabling their interpretation and use by humans or in analytics tools. In summary, whereas BACS are by definition highly digitized systems, they suffer a lack of digitally structured and interoperable information of their control functions that can be easily exploited by technicians and facility managers. This situation hinders the cost-effective implementation of corrective or optimization tasks and thus energy efficiency gains.

Over the last years, several approaches have been developed to address the lack of digitized information description methods in BACS and interoperability issues occurring from this situation. Most of them are based on the use of semantic web technologies (SWT). One main argument for the use of SWT is their capability to integrate knowledge from heterogeneous domains through a set of concepts and relationships. They can thus allow to describe the rules that govern the operation of building services in BACS. This information can then be used to support different tasks and methods like rule checking during a commissioning phase or rule-based fault detection during the operation phase of buildings.

In this paper, we present a hybrid approach for the digital description of control functions in BACS, combining the features of existing ontologies and of the IEC 61131-3 global standard for industrial control programming. These works are parts of the German funded Energie.Digital project that aims at developing an integrated representation of building service systems including physical and functional semantics as well as control logic.

STATE OF THE ART

Kučera and Pitner, 2016, present the Semantic BMS (Building Management System) ontology that aims at providing novel semantic description of building automation systems. The objective is to allow thirdparty applications to efficiently collect building operation data based on parameters that current semantic description of BACS do not provide. To overcome current data heterogeneity issues in BACS, Terkaj et al., 2017, have developed an ontology-based modelling approach using semantic web technologies. Their modular ontology reuses existing domain

ontologies like the SOSA (Sensor, Observation, Sample and Actuator) and the BACS ontologies and integrates information from Building Information Modeling (BIM) and from BACS including sensors and actuators, devices of BACS and control logic (Terkaj et al., 2017, Haller et al., 2017). Benndorf et al., 2017, developed a method and a tool chain to extend IFC files with control functions descriptions. They showed how simple control logics could be described by using existing IFC classes and how this information can be transformed and provided via SWT using the ifcOWL Web Ontology Language (Beetz et al., 2009). Dibowski and Massa Gray, 2020, presented an approach in which a knowledge graph is established as an integrated information model that provides information for all phases of a building's life cycle in a machine-interpretable way. They used existing ontologies, such as the Brick ontology, and extended them in order to model BACS requirements and control functions. One of the most complete approach using SWT for BACS control logic descriptions is provided by Schneider et al. (Schneider et al., 2017, Schneider, 2019). The authors have developed the CTRLont information model, which uses a semantic model to support and automate the engineering and operation of control logic in BACS. The concepts and relationships defined by the CTRLont allow integrating an explicit specification of the control logic with information from other domains, such as BACS and BIM models. Additionally, CTRLont also allows the specification of state-based control logic through the use of UML state machines, state graphs and schedules. The authors of the different approaches provide several use cases derived from real life applications to demonstrate their usability and potentials.

Nevertheless, a main problem with the approaches described above is the necessity to adapt and extend the existing ontologies and schemas like IFC to allow the description of the control logic, which was not the main objective of these schemas. Based on this finding, in this paper, we present a novel approach for the digital description of control functions in BACS, taking advantage of the features of the CTRLont and of the IEC 61131-3 global standard for industrial control programming. We show which elements are described in the different parts of the developed model and show how we couple and advantageously use the information in both domains on the basis of a simple control loop in an air handling unit.

DATA MODEL FOR HVAC CONTROLS DESCRIPTION

In this section, we succinctly describe the data model that we have developed for the description of control functions in BACS, which is based on the coupling of existing ontologies, the CTRLont, the SOSA and the SEAS (Smart Energy Aware Systems) ontologies with the OpenPLC project based on the IEC 61131 standard for programmable controllers.

The CTRLont ontology is a key component of our approach (Schneider et al., 2017, Schneider, 2019). The concept, the classes and their relationships are depicted in figure 1. The ontology is used to describe controllers with their inputs, outputs, parameters and their connection to the application logic.

A controlActor can be linked to its Inputs, Outputs and Parameters via the `hasInput`, `hasOutput` and `hasParameter` object properties. Each of these AnnotatedElements can be specified by a Medium, Unit, Quantity, SemanticType and DataType. The connection of the ControlActor to entities of the class ApplicationLogic can be created by the `hasApplicationLogic` property. Input and Output can be connected via the `isConnectedTo` object property.

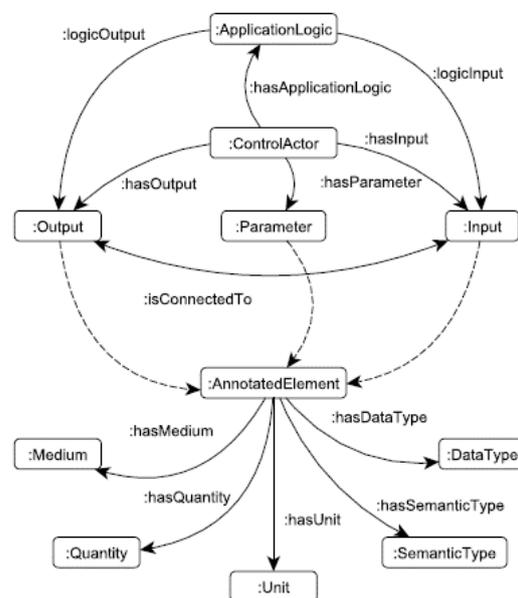


Figure 1: Concept and relationships of CTRLont ontology- own representation based on Schneider, 2019, p.67, fig.44

In addition to the CTRLont ontology, our model uses the SOSA ontology and the SEAS ontology respectively for the description of sensors and actuators and of systems (Terkaj et al., 2017, Lefrançois et al., 2017). The SOSA ontology is a core ontology of the Semantic Sensor Network (SSN) ontology. SOSA provides a standardised concept for describing sensors, their observations and actuators. The SEAS knowledge model is a family of ontologies that provide an abstract concept to describe physical systems on a generic level. In this work, we use one of its four core modules, the `seas:SystemOntology`, which defines a concept to define interrelated systems. The connections and interactions of different systems and their sub-systems can be described using the classes and properties of the SEAS ontology.

The last part of our model, which contains the control logic, is based on OpenPLC. OpenPLC is an open-source programmable logic controller, whose OpenPLC-Editor is the corresponding tool to create PLC programs in accordance with the IEC 61131 standard for programmable controllers (John and Tiegelkamp, 2009, Alves, 2020). The IEC 61131-3 defines three graphical (ladder diagram (LD), function block diagram (FBD), sequential function chart (SFC)) and two textual programming languages (structured text (ST), instruction text (IT)) that can be used in the OpenPLC-Editor.

METHODOLOGY

In this section, we first describe the general concept of our data model. Then, we show the implementation of the methodology on the basis of a simple use case.

Our general concept uses ontologies to describe the topological connections of the systems of which we aim to describe the control functions. The connections between sensors, controllers and the application logic are stored explicitly in an RDF (resource description framework) format. The SOSA ontology is used to characterize the sensors. The connections from the controller to sensors and actuators are described by using the SEAS ontology. The CTRLont ontology is used for the definition of the relationships between inputs, outputs and application logic of the controllers. Although ontologies have clear advantages to structure information and to maximize knowledge discoverability, they have not been adopted yet in BACS and we think that they are not suitable for the description of control logics. This is why we did not describe the actual control logic with an ontology-based method but instead used a programming language defined in the international standard IEC 61131-3 for programmable logic controllers. The program is written in the OpenPLC-Editor. The resulting source code, stored in a structured text-file (.st), is then linked to the entities of the CTRLont ontology (controllers, inputs, outputs, application logic) via a new ontology, specifically developed in our approach. Therefore it is possible to access and display the source code by using SWT. The classes and properties of this new OPLC ontology are described further below. A schema of the hybrid approach is shown in figure 2.

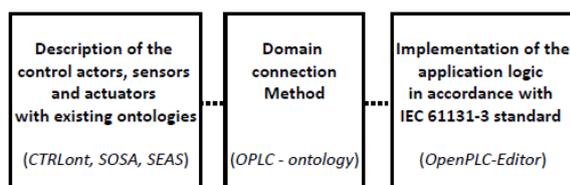


Figure 2: Schema of the hybrid approach

Use case description

We consider a simple use case of an Air Handling Unit (AHU) with a reset schedule for supply air temperature control.

The AHU comprises air filters, exhaust and supply air fans, a heat recovery system, a heating and a cooling coil. The heat recovery system can be bypassed. The bypass damper and the cooling and heating valves are controlled by actuators connected to PI controllers. In this simple use case, we illustrate our approach by only considering the cooling control loop including the two outdoor air temperature and supply air temperature sensors T1 and T2, the cooling coil valve and the controllers R1 and R2. The simplified control loop of this AHU is shown in figure 3 and its functions are described further below.

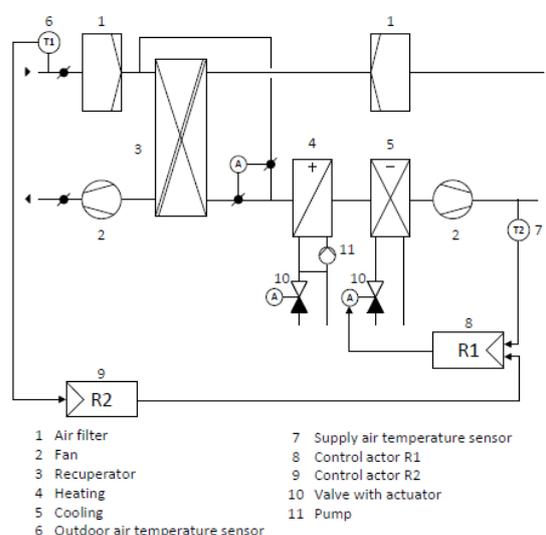


Figure 3: Simplified control loop of the implemented use case

Function description with OpenPLC

The control functions of the considered AHU control loops are only available as a textual description. In this work, we used a combination of the graphical function block diagram (FBD) and of the structured text (ST) programming language to implement the control logic. The textual description is converted into a function block diagram and the function blocks are implemented as structured text.

In this use case, we have defined the function blocks for the two controllers R1 and R2. The control logic of the controller R2 describes the calculation of the supply air temperature set point and is implemented as structured text. The supply air temperature control curve is shown in figure 4. If the outdoor air temperature is below the lower threshold of 19°C the set point of the supply air is set to 19°C. If the outdoor air temperature is above 32°C the set point is set to 26°C. In the range between these two thresholds the set point value is interpolated linearly. R1 is a PIDcontroller. Its control logic is already implemented

in the OpenPLC-Editor. The valve is controlled by the output value of the controller R1. The function block diagram of the controller R2 is shown in figure 5. It has three input variables (the outdoor air temperature and two temperature threshold values) and one output variable (the calculated supply air temperature set point).

An excerpt of the resulting structured-text (.st) file containing the implementation of the heating characteristic is shown in code 1.

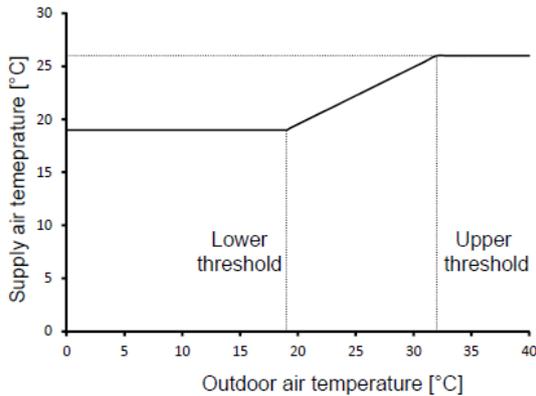


Figure 4: Supply air temperature set point in dependency of the outdoor air temperature

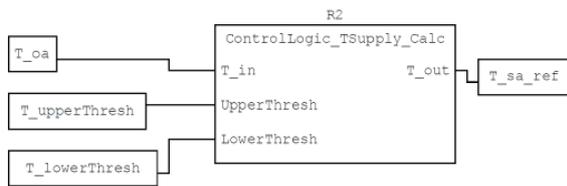


Figure 5: OpenPLC-Editor Function Block Diagram of the function block R2 that calculates the supply air temperature set point. Input: Outdoor air temperature (T_{oa}), upper temperature threshold ($T_{upperThresh}$), lower temperature threshold ($T_{lowerThresh}$); Output: Supply air temperature set point (T_{sa_ref})

Code 1: Excerpt of structured-text file – Implementation of the function block R2 that calculates the supply air temperature set point

```
FUNCTION_BLOCK ControlLogic_TSupply
VAR_INPUT
    T_in : REAL;
    UpperThresh : REAL;
    LowerThresh : REAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    T_out : REAL;
END_VAR

IF ( T_in <= UpperThresh ) THEN
    T_out := 19.0;
ELSE
    IF ( T_in >= LowerThresh ) THEN
```

```
        T_out := 26.0;
    ELSE
        T_out := 0.538 * T_in + 8.769;
    END_IF;
END_IF;
END_FUNCTION_BLOCK;
```

Domain connection method - the OPLC ontology

In the method we propose here, the OPLC ontology provides the tools to connect the elements of the CTRLont ontology to the control logic implemented in the OpenPLC-Editor. Up to now the ontology has not yet been formally designed for general completeness, but rather to realize the use case at hand. The following new classes and properties are defined:

Classes:

- PLCFile
 - File containing the source code that describes the control logic
- PLCInputVariable
 - Input variable of the PLCFile
- PLCOutputVariable
 - Output variable of the PLCFile

Object Properties:

- hasImplementation
 - Connection of the ctrl:ApplicationLogic to the PLC-file containing the source code of the control logic
- definesInputVariable
 - Connection of the PLCFile to the PLCInputVariable
- definesOutputVariable
 - Connection of the PLCFile to the PLCOutputVariable
- correspondsTo
 - Connection of an input/output variable in the PLCFile to an input/output in the CTRLont ontology

DataType Properties:

- hasFilepath
 - Connects the PLCFile to literal value of the file path
- hasVariableName
 - Connects the PLCVariable to a literal variable name

Graph structure

An ontology-based description of the use case is created by combining the existing CTRLont, SOSA and SEAS ontologies with the OPLC ontology. The graph has been designed as a general graphical representation based on graphml first (Brandes et al., 2002). This has then been converted into a turtle syntax representation, which again can be loaded and queried using the Python rdflib library (RDFlib Team, 2020). The resulting graph structure is presented in figure 6.

USE CASE APPLICATIONS

The graph structure can be used in different further applications that require an access to the control logic information. Possible use cases are simple consistency checks of the available static information, automated PLC programming and commissioning, use for fault detection and diagnostics of building services based on sensors and actuators time-series data provided by BACS.

One application is the discovery and verification of sensor identifiers used within the control logic. This check uses the information graph to relate the domain of sensor data with the one of the control logic. To reach this, several steps are required starting with the look up of active building components (i.e. the Actuator), the search for defined control outputs associated to this component and the capture of related controllers and their inputs. We use here a single SPARQL (Prud'hommeaux and Seaborne, 2008) query to realize these steps. By the use of SPARQL Paths and the *OPTIONAL* keyword, a generic yet effective query can be formulated (see Code 2). These queries rely on the use of types and relations from specific name-spaces; i.e. the SEAS and SOSA ontologies. Depending on the use case, these types and relations could also be replaced with entities from other ontologies if needed.

Code 2: Example SPARQL query for sensor input labels of the control logic

```
SELECT *
WHERE {
  ?dev rdf:type seas:Actuator;
  # get connected controller:
  (seas:connectsTo|^seas:connectsTo)/
  ^ctrl:hasOutput/

  #get further connected
  # controllers (if applicable):
  (ctrl:hasInput/
  ^ctrl:isConnectedTo/
  ^ctrl:hasOutput)*

  ?ctrl.

  #get the sensors (if applicable):
  OPTIONAL {
    ?ctrl ctrl:hasInput ?inp.
```

```
?inp ?pred ?sens.
?sens rdf:type sosa:Sensor.

OPTIONAL {
  ?sens rdfs:label ?dp.
}}
```

Once the sensor labels are obtained they can be collated with the ones available from the data acquisition system. Regular checks for availability, quality and validity of historic time series data ensure proper foundations for the controls. Like the labels of sensors used as inputs to the control logic, the labels of output signals are obtained in a similar manner. In the above use case the output of controller R2, is used as an input of R1. Since the dependency of the controllers has been determined in the previous step the remaining input and the output of controller R1 can be shown in relation the outside air temperature, the sole input to R2 (see Figure 7). Such graphical representations can again be used by a user to get better insight in the systems behavior.

Finally the code of the control logic implementation, referenced in the graph, can be accessed and shown to a user and thus enable a full understanding and verification of the designed control strategy.

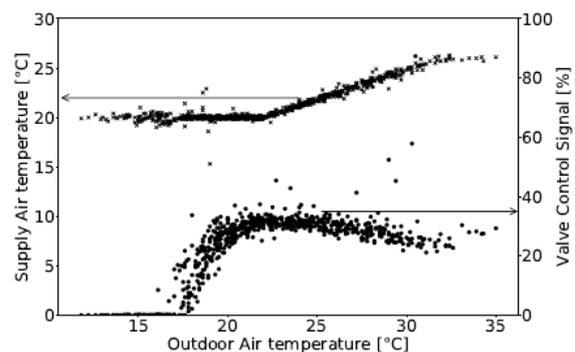


Figure 7: One month of measurement data: Input (left axis) and output (right axis) of controller R1 are lotted against the outside air temperature, the independent input to the control loop

DISCUSSION

The combination of Semantic Web Technologies with an IEC 61131-3 compatible programming language for the function description in BACS offers several advantages in comparison to the state of the art. Semantic Web Technologies allow to structure semantic information of controllers, sensors and actuators as well as their input and output data. They also allow knowledge discovery by means of queries and would thus enable retrieving information about the implemented control strategies from an unified information location during the whole life cycle of buildings. This feature would enable to streamline the commissioning and the maintenance of BACS by

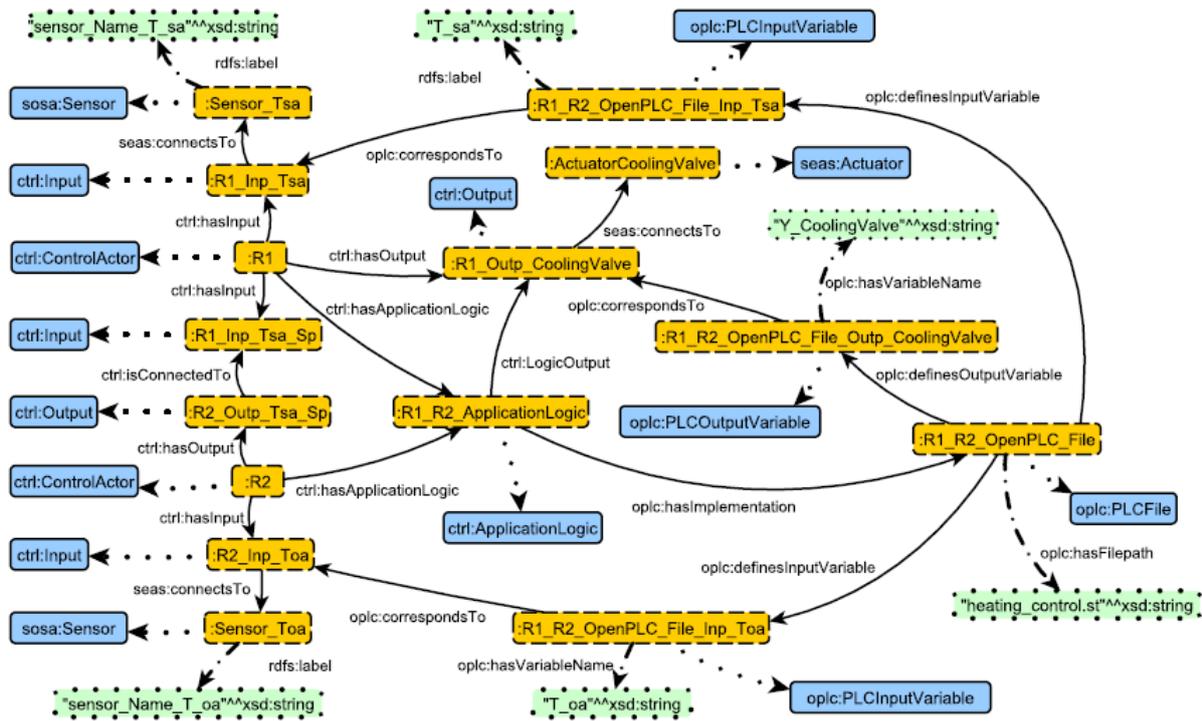


Figure 6: Ontology-based description of the use case. Legend: individual (yellow, dashed box); class (blue, solid box); literal (green, dotted box); object property (solid line); type (dotted line); data type property (dot-dashed line)

the maintenance of BACS by providing accessible and structured information to different stakeholders. However, from our point of view, ontologies are not well appropriate to describe control logics of building services and the use of programming language as defined in the IEC 61131-3 standard enables a better transfer of programmed control rules in real controllers. The developed hybrid approach combines thus the advantages of an ontology-based description of the topology of the systems with a language directly usable in Programmable Logic Controllers. It should then allow a better adoption by practitioners to support the design, commissioning and operation of BACS.

CONCLUSION AND FURTHER WORKS

In this paper, we presented a novel hybrid approach for the digital description of control functions in Building Automation and Control Systems by combining the features of existing ontology-based methods and of the IEC 61131-3 global standard for industrial control programming. We used the CTRLont, SOSA and SEAS ontologies to describe the topology of the system and the connections between sensors, controllers and actuators. We programmed the control logic description, namely the underlying control rules, with a programming language defined in the international standard IEC 61131-3 and the OpenPLC-Editor. We realised the connection between the existing CTRLont ontology with the control logic by means of a new ontology, the OPLC ontology. We

then demonstrated the application of the hybrid approach on the basis of a simple use case of an air handling unit and showed how the information can be used to check the control logic of the air handling unit.

The presented approach is still in an early development stage and we have only tested it for a simple use case. In a next step, we plan to apply the method to a more complex use case and to validate our approach by interacting with a BACS manufacturer. Another objective is the extraction of fault detection rules from the model that would enable to continuously supervise the operation of building services. Another possible application is for example the use of the control logic information to emulate a controller - that is to test all its functions and remove possible errors in a virtual environment - before its installation in a building and thus enhance the quality insurance of the commissioning phase. Currently the focus is on improving the presented hybrid approach but we plan to develop a software tool which allows a user to apply the method.

ACKNOWLEDGEMENTS

These works have been carried out within the project Energie.Digital funded from the German Ministry for Industry and Energy under grant agreement no. 03ET1611. The authors would like to thank the RWTH Aachen and Viega Holding GmbH & Co. KG for their contribution to the project.

REFERENCES

- Alves, T. Openplc project, 2020. URL <https://www.openplcproject.com/>.
- Beetz, J., van Leeuwen, J., and de Vries, B. Ifcowl: A case of transforming express schemas into ontologies. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 23(1):89–101, 2009. ISSN 0890-0604. doi: 10.1017/S0890060409000122.
- Benndorf, G., Réhault, N., Clairembault, M., and Rist, T. Describing hvac controls in ifc – method and application. *Energy Procedia*, 122:319–324, 2017. ISSN 18766102. doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.330.
- Bosseboeuf, D. Energy efficiency trends and policies in the household and tertiary sectors: An analysis based on the odyssey and mure databases. Technical report, 2015.
- Brandes, U., Eiglsperger, M., Herman, I., Himsolt, M., and Marshall, M. GraphML Progress Report Structural Layer Proposal. In *Graph Drawing*, volume 2265 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Berlin and Heidelberg, 2002. ISBN 978-3-540-45848-7.
- Dibowski, H. and Massa Gray, F. Applying Knowledge Graphs as Integrated Semantic Information Model for the Computerized Engineering of Building Automation Systems. In Harth, A., Kirrane, S., Ngonga Ngomo, A.-C., Paulheim, H., Rula, A., Gentile, A. L., Haase, P., and Cochez, M., editors, *The Semantic Web*, volume 12123 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 616–631. Springer International Publishing, Cham, 2020. ISBN 978-3-030-49460-5. doi: 10.1007/978-3-030-49461-2_36.
- Global Energy and Environment Research Team at Frost & Sullivan. European building automation systems (bas) market, forecast to 2025. Technical report, Frost & Sullivan, 2019.
- Haller, A., Janowicz, K., Cox, S., Le Phuoc, D., and Taylor, Kerry, Lefrançois, Maxime, editors. *Semantic Sensor Network Ontology*, 2017. URL <https://www.w3.org/TR/vocab-ssn/>.
- John, K.-H. and Tiegelkamp, M. Die Programmiersprachen der IEC 61131-3. In Tiegelkamp, M. and John, K. H., editors, *SPS-Programmierung mit IEC 61131-3*, pages 103–211. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009. ISBN 978-3-642-00268-7. doi: 10.1007/978-3-642-00269-4_4.
- Kučera, A. and Pitner, T. Semantic bms: Ontology for analysis of building automation systems data. In Camarinha-Matos, L. M., Falcão, A. J., Vafaei, N., and Najdi, S., editors, *Technological innovation for cyber-physical systems*, IFIP advances in information and communication technology, pages 46–53, Cham, 2016. Springer. ISBN 978-3-319-31165-4.
- Lefrançois, M., Kalaoja, J., Ghariani, T., and Zimmermann, A. D2.2 seas knowledge model. Technical report, ITEA 2, 2017.
- Prud’hommeaux, E. and Seaborne, A. SPARQL Query Language for RDF: W3C Recommendation, 2008. URL <https://www.w3.org/TR/rdfsparql-query/>.
- RDFlib Team. rdflib 5.0.0, 2020. URL <https://rdflib.readthedocs.io/en/stable/#>.
- Schneider, G. F. *Semantic Modelling of Control Logic in Automation Systems: Knowledge-Based Support of the Engineering and Operation of Control Logic in Building and Industrial Automation Systems*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2019.
- Schneider, G. F., Pauwels, P., and Steiger, S. Ontology-based modeling of control logic in building automation systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13(6):3350–3360, 2017. ISSN 1551-3203. doi: 10.1109/TII.2017.2743221.
- Terkej, W., Schneider, G. F., and Pauwels, P. Reusing domain ontologies in linked building data : the case of building automation and control. In *Proceedings of the Joint Ontology Workshops 2017 Episode 3: The Tyrolean Autumn of Ontology*, volume 2050, page 12, 2017.

DEVELOPMENT OF A CONCEPTUAL DATA MODEL FOR THE DIGITAL DESCRIPTION OF FAULTS IN THE BUILDING SYSTEMS' OPERATION

P. Alfonso¹, T. Rist¹, T. Müller-Eping¹, N. Réhault¹ and P. von Both²

¹Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, Germany

²Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany

ABSTRACT

Malfunctioning of Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) systems causes user discomfort and increases energy consumption. Fault detection and diagnostics (FDD) methods can contribute reducing energy losses by early detecting faulty operations of HVAC systems and thus supporting corrective actions. However, Model-based FDD methods require a vast amount of data for set-up, such as time-series data from sensors and actuators and semantic data documenting technical properties of the supervised systems. This paper presents the conceptual data model for a database, in which we aim to collect, describe, and classify semantic information about operational faults of HVAC systems, the buildings, the HVAC systems themselves including their data points (sensors/actuators). The main objective is to provide a semantically unified structure for the documentation of faults in HVAC systems to enable developers and engineers training, testing and comparing FDD methods.

INTRODUCTION

Several studies have shown that buildings consume more energy than originally planned. The difference between the energy performance target values and the actual energy consumption is known as “performance gap” (Kallab et al. 2017; Rory Jones and Pieter de Wilde 2015). Malfunctions in the operation of the Heating, Ventilation and Air Conditioning Systems (HVAC) are one of the factors that contribute to this phenomenon. System faults that remain undetected over large periods of time increase the energy consumption and cause financial losses. In the last decades, researchers have shown that significant energy savings could be achieved by early detecting the faulty operation of HVAC systems by using Fault Detection and Diagnostics (FDD) methods (Kim and Katipamula 2018).

FDD methods can be based on different mathematical models, each of which has its advantages and drawbacks (Kim and Katipamula 2018). The literature highlights the absence of a systematic testing and benchmark for FDD methods, which hinders the selection of the most appropriate FDD approach for each concrete real-life situation (Benndorf et al. 2018; Li and O’Neill 2018). In most of the cases, researchers use simulated faults to train and test the FDD methods, and evaluate the impact of the faults in the systems (Cui and Wang 2005; Yan Chen et al. 2018; Hong Tianzhen 2016; Yanfei Li and Zheng O’Neil 2016). However, Bruton et al. express the importance of testing the FDD tools with real data sets to increase their versatility (Bruton et al. 2014).

The set-up of FDD methods requires time series data from sensors and actuators, e.g. from Building Automation Systems (BAS) protocols and semantic information. Semantic data includes data point names, as defined in the BAS protocol and description (e.g.: name: “PG-344 Centrale Frigo(Temp. Uscita Torre TE01C” and description: “Tower Out TemperatureTE01C”); building architectural and structural aspects (e.g.: “ADR XX T1”); HVAC systems (e.g.: “TE01C” for the Cooling Tower); fault descriptions (e.g.: *Fault001*: Condenser Water Return Temperature Sensor Failure: Value Too High); and the FDD method (e.g.: type: rule-based, applied formula, etc.). Unfortunately, these data usually has no standardized schema or is incomplete. Without a unique defined structure, analysts expend a great effort in manually acquiring and understanding the information appropriately.

Researchers have done many attempts to structure the data in buildings by means of interoperable share knowledge resources, like standardized workflows and metadata standards. One of the most important metadata schemas is Industry Foundation Classes (IFC). It is an industry-specific data model, which is largely used in the building sector for the digital description of buildings in Building Information Modeling (BIM) (BuildingSmart 2020). An innovative approach is Brick schema (Brick Community 2020), which gathers contextual data of

buildings, systems, data points and their relations providing a concrete ontology (Balaji et al. 2016). It was built upon the idea of “tags” from **Project Haystack** (Project Haystack Corporation 2020). However, these schemas focus on the description of buildings, systems or/and data points and do not propose a model to describe HVAC operational faults. The challenge to build a fault database is to design a model that documents both: the semantic information of the building, its systems and data points, together with the FDD methods and the operational faults occurring in the HVAC systems.

This paper presents a conceptual data model for the description of faults in HVAC operation. For the conceptual model, we did not define all the specific terms and concepts to use in the structure of the description. We identified the domains of information that we need to describe the fault and how these groups relate to each other. In a second step, we developed an ontology and taxonomy for the model to describe the faults and FDD methods. With the ontology and taxonomy we identify, distinguish and give hierarchy to the specific terms and concepts to be used in each domain.

The information is encoded as semantic triples in which each semantic statement has the format: subject–predicate–object (e.g.: “Fault001 isLocatedIn TE01C”). The conceptual data model is the ground foundation of a Triplestore or **Resource Description Framework** store (RDF store) for the collection of semantic information of HVAC operational faults. The objective is to use this structured information to parameterize and systematically test FDD methods.

In this article, we first describe the conceptual data model, highlighting the information groups and relations. Then we explain the ontology and taxonomy (normalized vocabulary and its hierarchy) developed to describe the operational faults. Afterwards, we give an example of a fault description using the ontology. Finally, we conclude and propose additional work.

STATE OF THE ART

Collecting and interpreting buildings semantic data involve labor intensive effort by experts. Finding a complete schema to describe the vast variety of buildings, systems and data points remains still a challenge. A data schema should at minimum be able to model the buildings architectural and structural aspects, the systems technical data and the relevant data points. In the following, we provide an overview on the state-of-the-art of the last years on semantic schemas developed for digital building descriptions.

Project Haystack (Project Haystack Corporation 2020) is an open source initiative to standardize semantic data models. By providing a common taxonomy,

Haystack defines “tags” that are associated to the entities, such as an air handling unit or a data point. The vocabulary (metadata terminology in the “tags”) describes the building equipment, data points and properties without changing the entity name. Entities are linked through references “tags”.

IFC allows a digital description of the building during its whole lifecycle. A wide range of software support *.ifc* files. It captures the buildings structure and the relationship of the building components. The later version allows modeling sensors, actuators and controllers. The data format/standard “Construction Operations Building Information Exchange” (COBie) supports IFC with simpler export formats (E. William East 2007). The **Green Building XML** schema is another BIM exchange format with focus on the energy performance analysis (gbXML.org 2020).

The **World Wide Web Consortium (W3C)** proposes a formal language and rules to handle data on the Web. Their idea of a vocabulary is a group of defined concepts, domain hierarchy and definitions to help the data interaction (W3C 2020). For example, the **Semantic Sensor Network ontology (SSN)** (OGC & W3C 2020) describes sensors with focus on their measurements, their observation and methods. However, it lacks of formal language to describe the location, units or features, but it can be linked from other ontologies. The project **Smart Appliances REFERENCE (SAREF)** unified different ontologies to be used in smart appliances (Frank den Hartog et al. 2015).

Bhattacharya et al. (2015) analyzed in their paper the three metadata schemas for buildings: **Project Haystack**, **IFC** and the **Semantic Sensor Web** through the **SAREF** project. The paper evaluates the capacity of the schemas to model the contextual, spatial and functional relationship between the sensors and the building environment (Bhattacharya et al. 2015). The results show that none of the three schemas captures all the required data. Based on this finding, **Brick** developed a schema reusing some concepts of the above mentioned schemas, and defining a new ontology to represent the sensors, systems and the relationship among them (Balaji et al. 2016).

We developed our model following the work done in **Brick** and focusing on the documentation of the faults in the building systems operation and the FDD methods. The completeness of the **Brick’s** taxonomy and the flexibility of the **Brick’s** ontology allow us to combine **Brick** with our ontology, which describes the faults and the FDD methods. We used the **Brick’s** ontology to model the HVAC systems and the data point; and developed our own ontology for description of the faults and FDD methods.

CONCEPTUAL DATA MODEL OF OPERATIONAL FAULTS

The conceptual data model for the digital description of the operational faults focuses on capturing the semantic data and relationships of buildings architectural and structural aspects, HVAC systems, data points, FDD methods and faults. Real data and results from previous projects are the ground information to drive the basic requirements of the conceptual data model. As an example for this paper, a typical fault scenario denoted by “Fault001: Condenser Water Return Temperature Sensor Failure: Value Too High” is introduced. In the next section, we show how our ontology is used to describe this fault.

The diversity of building systems and their available metadata require a flexible model that deals with uncertainty and expansion. A triple structure states that a subject (resource) has a relationship predicate (relationship) with an object (resource or literal) (Ora Lassila and Ralph R. Swick 2020). This structure has been proved to correctly represent large, interconnected amounts of data. By using this concept we also benefit from already developed standards: RDF, RDF schema (RDFS), Web Ontology Language (OWL) and Brick. Reusing them allows us to focus on developing unified and structured data model to digitally describe HVAC systems operational faults. From our current knowledge, such data model is still inexistent.

We defined five domains of information related to the detected operational faults: Building, HVAC Equipment, Data Point, FDD method and Fault (Figure 1). Within the five groups, it is possible to collect all the relevant information to document the fault. Afterwards, we aim to query the semantic information from the database to label the time-series data as faulty or fault-free.

The labeled data, together with the FDD parameters (e.g.: temperature thresholds of a rule-based system), data point structured description (e.g.: supply air temperature sensor and supply air temperature set point), HVAC technical information (e.g.: nominal power consumption), and building structure (e.g.: supplied zones) parameterize the FDD method, which can be an already existing method or a new one. In case of evaluating a new FDD method, its results - the detected faults in a system - can be compared against the fault documented in the database for the same system, to measure its accuracy.

- **Building:** captures the descriptive semantic information of the architectural and structural aspects of the buildings, e.g.: allocation of the space, rooms and zones. Other properties like year of construction, ground floor and geolocation are included.
- **HVAC Equipment:** captures descriptive semantic information about the HVAC equipment

and their technical data. The relationships with the other groups model its location, its related data points, and its detected faults. Also, it relates to itself to model its subsystems.

- **Data Points:** captures the name of the data points and characteristics, like unit of de measure values (e.g.: kW, °C).

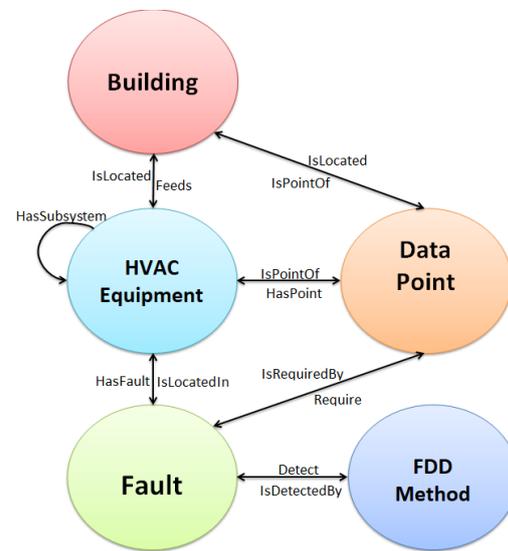


Figure 1: Information domains and their relationship

- **FDD Method:** captures descriptive semantic information about the FDD method (e.g. type: black box, grey box), and the details used to detect each fault (parameters, ranges, formulas, etc.).
- **Fault:** captures descriptive semantic information about the detected operational faults, together with the time range of the occurrence. The next section details its taxonomy and ontology.

Each domain is designed using an arch-node graph, and the statements follow a triple structure. The model has resources and attributes. The resources are the subjects and objects of the triple. The attributes include the data properties as objects of the triple and relationships as predicates of the triple. The objects of the triple act as “tags”. A “tag” contains a semantic term or concept (a word). A “tag” or group of “tags”, linked to a subject, provides the semantic description for the subject. This concept follows the idea of “tags” and “tag-sets” from Project Haystack and Brick (Project Haystack Corporation; Brick Community). Providing a defined vocabulary for the “tags” (ontology and taxonomy), it is possible to document the detected operational faults in a standardized way.

ONTOLOGY AND TAXONOMY

An item “to tag” (subject in the triple) relates (predicate in the triple) to a “tag” (object in the triple). The items “to tag” are elements in the database that we want to describe (e.g.: Fault001). All the “tags”, linked to the same resource, structure the description of item “to tag”. Each “tag” contains a concept. A concept is a piece of semantic data used to describe the items “to tag” (e.g.: “Fault”, “Supply”, “Cooled_Air”, “Sensor_Failure”, “Pressure”). We defined a minimum of concepts needed to describe the operational faults. We use a group of four “tags” to describe the faults (“*four tag system*”).

The taxonomy and ontology provide the formal language for the “tags” and the hierarchy structure for the vocabulary. Individual terms describing the same characteristic are grouped into a global concept. Global concepts and items “to tag” are the classes in the ontology. The individual concepts are the subclasses.

Four tag system

Supplementary to the operational faults found in different HVAC systems, we analyzed operational faults from the literature (Roth et al. 2004; Cheung and Braun 2015). From them and based on the “tag” concept we built a “four tag system” (Figure 2). The four classes for the “four tag system” are:

- “**Position tag**”: Indicates the position of the fault (e.g. supply, room). Additional positions like “in” or “before” are available. In these cases it is necessary to specify the equipment related to the position.
- “**Medium tag**”: Indicates the physical medium transporting the energy (e.g.: Water, Air).
- “**Measurement tag**”: Indicates the variable being measured (e.g.: temperature, volume flow). In case the fault affects the relation between two or more systems (e.g.: asynchronous operation), all the affected measures are considered (e.g.: “*Operation_Status>Fan*” and “*Operation_Status>Condenser>Pumps*”).
- “**Fault description tag**”: Defines four distinctive faults’ types. Additional data properties allow adding details to the description.
 - *DP fault*: there is a fault in the measure of the sensors or commands.
 - *Target value/limit*: the target value or set point is exceeded or not reached.
 - *Alarm*: an alarm indicates a malfunction in a system.
 - *Mechanical or operation element fault*: there is a mechanical, electrical or electronic problem in some of the HVAC component, without including the DP (e.g.: “Supply Air

Fan Return Air Fan Mismatch” or “Cooling Coil Hydronic Valve Hunting”).

Figure 2 shows a schema of the “four tag system”. First, an item “to tag” (e.g: Fault001) is model as `rdf:type` with the “tag”: “Fault”. Then, each “tag” (“Return”, “Condenser_Air”, “Sensor_Failure”, “Temperature”) from the “four tag system” relates to the item, adding the semantic information needed to describe the fault. Finally, the “tags” relates further to other concepts, extending the description.

Taxonomy and hierarchy

Basic terms commonly use at our labs provide the vocabulary for the ontology (Figure 3). For the fault ontology, the “Position”, “Medium”, “Measurement” and “Fault description” define the classes in the ontology. The classes and subclasses have data properties, like value and unit, to add details. The data properties and relations are set at a resource level (subject and object of the triple), which means that the “tag” (concept) relates directly with the item “to tag”. Additionally, as each tag is independent from each other, it increases the flexibility in the description, allowing the model to deal with uncertainties and novelties. For example, in the case the position of a sensor is unknown (uncertainty), the “Position tag” can be avoided or added afterwards. Moreover, each item “to tag” can have several “tags” from the same class. Also, we considered an “undefined_tag” in each class, for concepts that are not considered in the ontology.

Additionally to the fault ontology, we developed an ontology to describe the FDD methods and their parameters. The applied taxonomy uses concepts extracted from the bibliography (Srinivas Katipamula and Michael R. Brambley 2005a, 2005b).

We differentiated between automatic and manual methods. In the manual method, the expert detects the faults by manually analyzing the information (expert knowledge). For the automatic methods, model-based and rule-based algorithms are used to detect the faults with more or less human intervention. Here, the model-based FDD algorithms are subdivided into two different approaches which are based on the comparison of the current plant measurements either with the data given by a simulation model describing the nominal behavior of the system or with historical plant measurements that have been identified as normal operation by expert knowledge. Additionally a “*hybrid_tag*” is added for combined methods.

Depending on the FDD method, the required parameters vary, in which case only the “Limit” and “Threshold” are considered as subclasses of “FDDParameters”. The “FDDParameters” class includes the data properties: name, value, unit and description, which allows modeling a wide range of information.

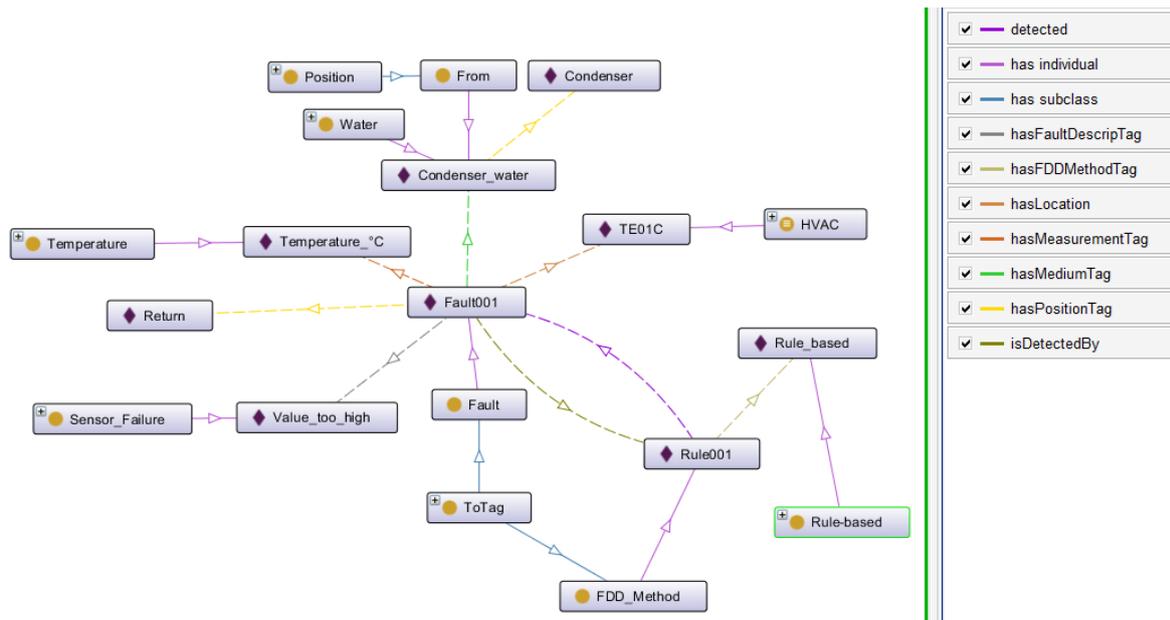


Figure 2: “Four tag system” schema

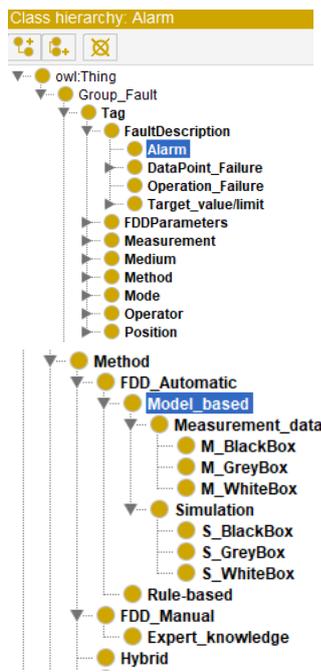


Figure 3: Fault and FDD method ontologies in Protégé (Stanford University 2020)

RESULTS

The database aim to provide researchers with real and structured descriptions of the building systems operation faults. The structured semantic data aim to reduce the time consumed nowadays in processing the information to set up the FDD methods.

Using the resources as “tags” allows the user to maintain the faults, data points and systems’ names, linking it with predefined concepts and additional unstructured semantic data. It increases the flexibility

of the schema, but at the same time allows developing automatic queries to retrieve the data.

Through the “Fault description tag”, it is possible to identify the cause/type of fault. These data is used to train a model-based FDD method, adding the fault type to the fault occurrence and the component malfunctioning.

Our study also shows that Brick performs better than other data schemas, when modeling data points. We selected Brick, together with our ontology, to populate the data base.

FUTURE WORK

Next steps include linking Brick with our ontology to model the HVAC systems and its data points.

Before developing the database, future works will focus on testing the ontology by using data from several commercial buildings. The results will show if the taxonomy models the HVAC equipment and document their faults in their totality.

After ensuring the ontology, we will start working on linking it to the FDD methods for their parameterization and comparison.

SUMMARY

Researches show that although the use of FDD methods has increased in the last decades, there is still a gap for a systematic testing and benchmark for FDD methods. One of the reasons is the lack of a common framework and available data, like fault identification, to train and compare the methods. Experts consume high amount of time and effort to collect and process the semantic information, to set-up the methods,

which makes the FDD training and comparison not economically profitable in some cases.

Experts have done many attempts to develop semantic data schemas to increase the interoperability of data exchange (Brick Community 2020; Project Haystack Corporation 2020). However, none of the current developed schemas provide a taxonomy for the description and the classification of faults in HVAC systems.

As an attempt to fill this gap, here we presented a conceptual fault data model to digitally describe and classify faults detected in the operation of HVAC systems. The conceptual fault data model builds the basis for the development of a fault database (RDF store).

Additional to the model, we developed an ontology and a taxonomy. We chose a “tag” approach, similar to Project Haystack and Brick. The objects in the triple statement act as “tags”. Each “tag” provides a semantic concept; the linked resources define the description of an item (e.g.: fault) without changing its name.

We aim to provide a source of semantically unified data of documented faults in HVAC systems. The data will enable developers to set up and compare FDD methods.

Future work includes linking the developed fault ontology with Brick to complete the ontology and taxonomy for the development of the data base.

PUBLICATION BIBLIOGRAPHY

- Balaji, Bharathan; Agarwal, Yuvraj; Berges, Mario; Culler, David; Gupta, Rajesh; Kjærgaard, Mikkel Baun et al. (Eds.) (2016): Brick: Towards a Unified Metadata Schema For Buildings. BuildSys '16,. Palo Alto, USA.
- Benndorf, Gesa A.; Wystrcil, Dominik; Réhault, Nicolas (2018): Energy performance optimization in buildings: A review on semantic interoperability, fault detection, and predictive control. In *Applied Physics Reviews* 5 (4). DOI: 10.1063/1.5053110.
- Bhattacharya, Arka; Ploennigs, Joern; Culler, David (Eds.) (2015): Short Paper: Analyzing Metadata Schemas for Buildings: The Good, the Bad, and the Ugly. BuildSys'15. Seoul, South Korea.
- Brick Community (2020): Brick schema. Available online at <https://brickschema.org/>.
- Bruton, Ken; Raftery, Paul; Kennedy, Barry; Keane, Marcus M.; O'Sullivan, D. T. J. (2014): Review of automated fault detection and diagnostic tools in air handling units. In *Energy Efficiency* 7 (2). DOI: 10.1007/s12053-013-9238-2.
- BuildingSmart (2020): Building Information Modeling (BIM). Available online at <https://www.buildingsmart.org/>.
- Cheung, Howard; Braun, James E. (2015): Development of Fault Models for Hybrid Fault Detection and Diagnostics Algorithm. NREL.
- Cui, Jingtian; Wang, Shengwei (2005): A model-based online fault detection and diagnosis strategy for centrifugal chiller systems. In *International Journal of Thermal Sciences* 44 (10). DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2005.03.004.
- E. William East (2007): Construction Operations Building Information Exchange (COBIE): Requirements Definition and Pilot Implementation Standard. US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center.
- Frank den Hartog; Laura Daniele; Jasper Roes (2015): Study on Semantic Assets for Smart Appliances Interoperability. SAREF. TNO.
- gbXML.org (2020): Green Building XML. Available online at <https://www.gbxml.org/>.
- Hong Tianzhen (Ed.) (2016): Modeling and simulation of operational faults of HVAC systems using ENERGYPLUS. SimBuild'16. Salt Lake City, UT.
- Kallab, Lara; Chbeir, Richard; Bourreau, Pierre; Brassier, Pascale; Mriisa, Michael (2017): HIT2GAP: Towards a better building energy management. In *Energy Procedia* 122. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.399.
- Kim, Woohyun; Katipamula, Srinivas (2018): A review of fault detection and diagnostics methods for building systems. In *Science and Technology for the Built Environment* 24 (1). DOI: 10.1080/23744731.2017.1318008.
- Li, Yanfei; O'Neill, Zheng (2018): A critical review of fault modeling of HVAC systems in buildings. In *Build. Simul.* 11 (5). DOI: 10.1007/s12273-018-0458-4.
- OGC & W3C (2020): Semantic Sensor Network Ontology. Available online at <https://www.w3.org/TR/vocab-ssn/>.
- Ora Lassila; Ralph R. Swick (2020): Resource Description Framework (RDF) Model and Syntax Specification. Available online at <https://www.w3.org/TR/1999/REC-rdf-syntax-19990222/>.
- Project Haystack Corporation (2020): Project Haystack. <https://project-haystack.org/>.
- Rory Jones; Pieter de Wilde (Eds.) (2015): The gap between simulated and measured energy performance: A case study across six identical new-build flats in the UK.
- Roth, Kurt W.; Westphalen, Detlef; Llana, Patricia; and Feng, Michael (Eds.) (2004): The Energy Impact of Faults in U.S. Commercial Buildings. *International Refrigeration and Air Conditioning '04*. West Lafayette, In.

- Srinivas Katipamula; Michael R. Brambley (2005a): Methods for Fault Detection, Diagnostics, and Prognostics for Building Systems— A Review, Part I. In HVAC&R RESEARCH 11 (1).
- Srinivas Katipamula; Michael R. Brambley (2005b): Methods for Fault Detection, Diagnostics, and Prognostics for Building Systems— A Review, Part II. In HVAC&R RESEARCH 11 (2).
- Stanford University (2020): A free, open-source ontology editor and framework for building intelligent systems. Protégé. Available online at <https://protege.stanford.edu/>.
- W3C (2020): SEMANTIC WEB. Vocabulary. Available online at <https://www.w3.org/standards/semanticweb/ontology>.
- Yan Chen; Sen Huang; Draguna Vrăbie (Eds.) (2018): A simulation based approach for impact assessment of physical faults: large commercial buildings HVAC case study. Building Performance Modeling '18. Chicago.
- Yanfei Li; Zheng O'Neil (Eds.) (2016): An EnergyPlus/OpenStudio based Fault Simulator for Buildings. ASHRAE Winter Meeting. Orlando, FL.

IFC TO BUILDING ENERGY PERFORMANCE SIMULATION: A SYSTEMATIC REVIEW OF THE MAIN ADOPTED TOOLS AND APPROACHES

M. Elagiry¹, N. Charbel², P. Bourreau², E. Di Angelis³ and A. Costa¹

¹R2M Solution srl, Pavia, Italy

²Nobatek/INEF4, Anglet, France

³Politecnico Di Milano, Milan, Italy

ABSTRACT

Due to the fast digital transition of the Architecture, Engineering, Construction, Owner Operator (AECOO) industry, a large amount of information is regularly exchanged between the involved participants. Handling and processing the exchanged data remain a major challenge for many related activities, such as Building Energy Performance Simulation (BEPS). In this context, the interoperability between Building Information Models (BIM) and BEPS models is still an unresolved issue. Many barriers prevent the full integration and data exchange between both models, such as geometry errors and missing data, which require a lot of human intervention. Thus, the process is still regarded as time, effort and cost consuming. In the literature, many works have been done to tackle this problem. In this paper, in the context of the BIM4Ren European H2020 project, which aims at providing BIMbased tools and technologies for fast and efficient renovation of residential buildings, a systematic workflow is proposed to handle the BIM to BEPS process and review the commonly adopted tools and approaches for each of its stages, i.e., from the generation of the BIM model, its geometry check, its data enrichment until its exploitation by a BEPS tools. The proposed workflow is based on the Industry Foundation Classes (IFC) as an information exchange standard for the BIM since it is an open data schema that is commonly used and compatible with most of the BIM software in the market. Finally, a practical approach to follow for a smooth and effective model transfer process is concluded.

INTRODUCTION

A BEPS model is an abstraction of the real building which allows to simulate its behaviour taking into consideration the influences of its geometrical details and physical properties and to analyze key performance indicators (KPIs). This model has a considerable potential that provides the ability to quantify and compare the relative cost and performance attributes of a proposed design in a realistic manner and at relatively low effort and cost.

On the other hand, a BIM model is defined by the National Institute of Building Sciences (NIBS) (2017) as a digital representation of physical and functional characteristics of a building. As such, it serves as a

shared knowledge resource for information about a building forming a reliable basis for decisions during its life-cycle from inception onward. Therefore, by definition, BIM models should also include the physical properties of the building and allow the analysis of its performance as well. However, the communication between BIM and BEPS models are not complete due to the different modelling objectives, modellers and data models that are currently used to build them. Moreover, there is always a need to perform a more sophisticated analysis for accurate results.

Some tools (e.g. Green Building Studio by Autodesk (2013) and Sefaira (2013)), which are integrated in a BIM modelling software, allow performing simplified simulations to give initial indications about the building performance using a controlled export of gbXML (Green building XML (2015)) models. However, as mentioned by Korolija and Zhang (2013), simplified models may lead to an error margin of 15% in addition to the error margin created by the simplification and assumptions while creating the energy models, thus leading to confusing results. Besides, they use simplified HVAC models with generic inputs which doesn't reflect its real performance.

Differently, the other tools, that allow the desired sophisticated analysis such as IES-VE (IES (2019)) or Energy-Plus (U.S. Department of Energy (DOE) (2020)), require, in most of the cases, a complex data exchange with the BIM modeling tools such as Revit by Autodesk (2020) or Archicad by GraphiSoft (2019), which creates many interoperability problems, not just in terms of the energy simulation but the whole asset management. This exchange is mostly done by the use of Open BIM data schemas, such as the Industry Foundation Classes (IFC, developed by buildingSMART (2013)) and gbXML, which are mainly created to solve the interoperability issues. The popularity of these two schemas led many leading AECOO software companies to implement support for IFC and gbXMLbased exchanges within their BIM authoring suites, yet these data schemas do not allow for an accurate, consistent and complete data exchange and thus create many problems such as geometrical errors and missing or incorrect data. This leads to a deficiency in the interoperability process, which prevents users to take advantage of valuable information during design, commissioning and operation.

Addressing this issue will enable a two-way information exchange to speed up the design process and facilitate digital design. Therefore, a wide variety of attempts have been proposed to establish an automated data exchange between BIM and BEPS tools. This paper aims at providing a systematic review of these attempts and proposing a general workflow that will be adopted in the BIM4Ren project. For each step of the proposed workflow, a list of different tools that can be used is provided together with advantages and drawbacks of each tool.

BIM4Ren context

BIM4Ren (2018) is an H2020 funded project, which stands for Building Information Modelling (BIM) based tools & technologies for fast and efficient RENovation of residential buildings. It aims at exploiting the BIM potential for the energy renovation of existing buildings for the whole construction value chain.

An expeditious energy retrofit of the existing building stock is required to successfully achieve the 2030 climate and energy framework key targets by having at least 40% cuts in greenhouse gas emissions (from 1990 levels), at least 32% share for renewable energy, and at least 32.5% improvement in energy efficiency. Thus, in order to ensure the acceptance of the refurbishment culture within the AECOO sector, significant progresses are necessary: (i) improve the quality of the renovation, (ii) reduce the time of phases and inter-phases (planning, design, construction, operation, and maintenance), (iii) minimize the impact on tenants, and finally (iv) guarantee that cost/benefits targets are accomplished among other predefined KPIs. Moreover, coordination among stakeholders during all phases is fundamental to ensure tight deadlines and overcome the common fragmentation of the AECOO sector. BIM4Ren aims to address all these objectives by developing a platform that integrates different innovative tools that can be used in all the stages of the renovation. Doing that, a technical development is needed and a proposal of extending the IFC schema is submitted. Furthermore, a communication with standardization bodies and similar research projects is conducted to extend the benefits of the research outcomes. One of the technical challenges is the interoperability between BIM models and BEPS models, which is a key factor that affects all the previous mentioned processes. This paper is focusing on this issue.

IFC vs gbXML

Open BIM is a universal approach to the collaborative design, realization, and operation of buildings based on open standards and workflows, that aims at tackling interoperability issues between different BIM software. The main purpose of Open BIM data models, is to allow for a smooth data exchange between the different tools in the AECOO industry. IFC and gbXML data are examples of open BIM models. They are the most commonly used in the process of BIM to BEPS and there is a big debate on

the data model that best fits in this process. In the BIM4Ren project, IFC is the main exchange format between the different tools used within the project. A further extension to the IFC schema will be proposed in favor of the BIM to BEPS process. In this section a brief description of the main differences between IFC and gbXML data models is provided to further explain the choice of the IFC format as the main focus in this paper.

Industry Foundation Classes (IFC), developed by buildingSMART (2013), is a standardized, digital description of the built environment, including buildings and civil infrastructures. It is an international standard (ISO 16739-1:2018), meant to be vendor-neutral, or agnostic, and usable across a wide range of software platforms and interfaces for many different use cases. IFC is a generic exchange format, that can be used across many domain specific software, thus contains a variety of data.

As for gbXML (Green building XML (2015)), it is a more simple schema and focuses on environmental data. It is now commonly adopted as a *de facto* standard by energy simulation software vendors. It is developed to facilitate the transfer of building information stored in BIM models, enabling interoperability between disparate building design and engineering analysis tools. It is based on a consolidated web standard syntax XML, which is powerful in its expressiveness, and data structuring.

On the one hand, IFC adopts a relational approach to represent an entire building project, which results in a relatively complex data representation schema and a large data file size with the possibility to use the Model View Definition (MVD) format to filter the data based on needs. On the other hand, gbXML adopts a more flexible approach and relatively straightforward as the BEPS is its main focus.

In IFC files, it is possible to trace back all the semantic changes when one value of the element in the schema changes. In terms of geometry, the generic approach of IFC has the ability to represent any shape of building geometry, while gbXML only accepts rectangular shape, which is enough for energy simulation, Dong et al. (2007). One would say that gbXML would be more suitable than IFC as an exchange format between BIM to BEPS, as the gbXML has less layers of complexity and it is mainly designed for energy modelling purposes. However, to our knowledge, there are still limitations on what can be transferred between BIM and BEPS models for both formats. Within the framework of BIM4Ren project, different BIM models from the project pilots and test models have been used to test transition process. IFC and gbXML models have been generated from each BIM model (at the date of this paper), and a comparison between the generated models has been conducted. The transition process output is about 90% similar in both models (same geometry errors, missing items, etc.), though IFC has the ability to automatically maintain semantic integrity.

Furthermore, IFC is widely used as an exchange format between most tools in the AECO industry, while gbXML is only used for BEPS tools. Thus, it would make more sense to further develop IFC models than gbXML for the reasons stated earlier. Another suggested approach within the BIM4Ren project would be fixing IFC files then transferring it to gbXML file ready for simulation. There are some existing tools and methodologies that convert IFC to gbXML, using the BIM tools to import the IFC such Revit by Autodesk (2020) then convert it to gbXML, or using a conversion tool such as IFC to gbXML converter developed by Maarten (2016). Moreover, there are other tools that convert gbXML to IDF, yet these tools are not addressed in this paper.

Current exchange problems and limitations

The model Level of Development (LoD) describes the level of detail to which a model is developed and its minimum requirements. The LoD is accumulative and should progress from LoD 100 at Conceptual Design to LoD 400 at completion of Construction, as mentioned by Bloomberg et al. (2012). A BIM model has usually a higher LoD than a BEPS model would require. There are fundamental differences between a BEPS model that is used to analyze the building performance and a BIM model that is used to generate construction documents, and the ability to cycle through design options in a timely manner requires understanding of both models. From the BEPS modelling perspective, it requires only relevant information w.r.t. the question at hand, reducing variables, thus reducing analysis time. From the BIM modelling perspective, the visual character of the overall model is important to convey the design intent as well as the detail to express the layering of ideas. A wall with multiple layers will be modelled in a BIM model as a geometry with multiple surfaces with the relevant thickness of each of these layers, while in a BEPS model, it will be modelled as a single surface with the layers as information as seen in Figure 1. That fundamental differences lead to many geometrical mistakes and model errors. When carrying out design

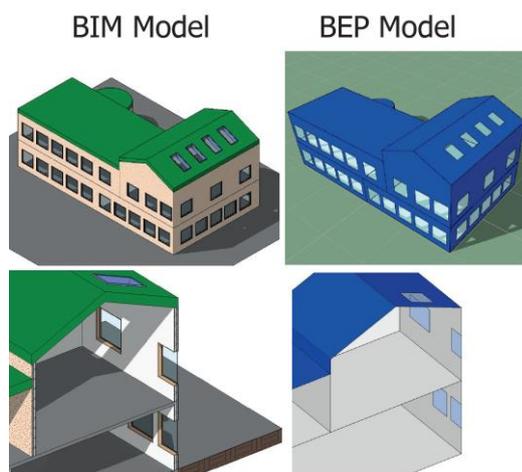


Figure 1: BIM vs BEPS models

exploration at different stages of the process, it is advisable to utilise the appropriate level of detail for the analysis, making it easier to focus on outputs that can inform the design. A large amount of details at the early stages can cloud the fundamental design decisions.

The main problems in the exchange process between BIM and BEPS models can be classified according to the following data quality metrics: (i) Accuracy, (ii) Completeness, and (iii) Consistency, as described by Katsigarakis et al. (2019). As for the data accuracy, it refers to the degree to which data correctly represents the “real-life” objects they are intended to model. The IFC file has to be free of geometrical errors (clashes, space definition errors, surface orientation errors). As for completeness, missing or incomplete data is one of the most important data quality problem in many applications, as mentioned by Sattler (2009). Many BIM elements support information exchange identifying the thermal performance characteristics that are needed to run energy analysis, however, BIM users are not required to specify these values or they tend to use default ones. Therefore, a consistent thermal analysis cannot be performed without the appropriate characteristics. The IFC file has to contain all the needed information to perform an energy simulation such as:

- Physical and thermal properties of the building envelope;
- 2nd level space boundary information (See Figure 2), i.e., surfaces through which thermal energy flows, whether among internal building spaces or between a building space and the buildings’ outside environment such as air/ground;
- Some contextual data (schedules, gaining profiles, etc.).

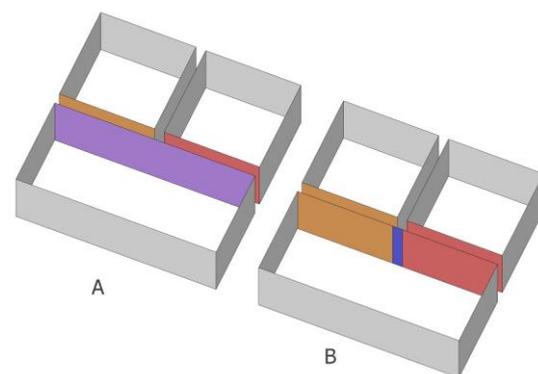


Figure 2: 1st (A) and 2nd (B) space boundaries

As for consistency, it refers to the degree to which data managed in a system satisfies specified constraints or rules, Sattler (2009). The IFC file has to be consistent with the BIM model in aspects such as location, units and orientation.

BIM to BEPS-based Workflow

This sections briefly overviews mainly adopted tools and approaches for each stage of the BIM to BEPS workflow (See Figure 3), namely (i) the identification

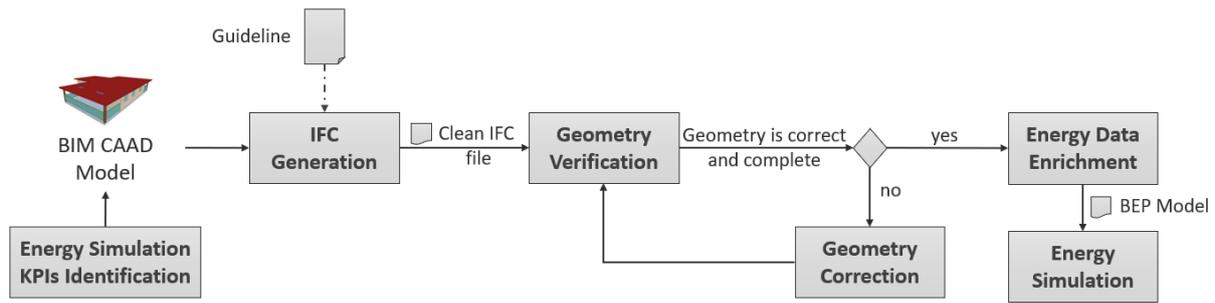


Figure 3: A systematic BIM to BEPS overall workflow

of energy simulation KPIs, (ii) the generation of the IFC file, (iii) the verification of its geometry and its correction if needed, (iv) the enrichment of the IFC file with required energy data and (v) the energy simulation based on the enriched IFC file.

Energy Simulation KPIs Identification

An initial step in the BIM to BEPS workflow is to identify the energy simulation needs or the questions that the final stage of the process should answer. These needs should be defined as KPIs, which are application dependent. For instance, in the context of the BIM4Ren project, a set of energy KPIs has been defined for the renovated buildings such as the primary energy demand and consumption and the energy savings.

IFC Generation

A big percentage of the errors encountered at the simulation phase is due to how the geometry is generated in the first place. The transition from BIM to IFC may produce errors that need to be fixed before importing the IFC into a BEPS tool, as those errors will still be reflected in the energy model. An example can be seen in Figure 4. Besides, BIM models can include many unnecessary details, because they are usually generated by a BIM specialist for a purpose related to their own domain rather than energy modelling.

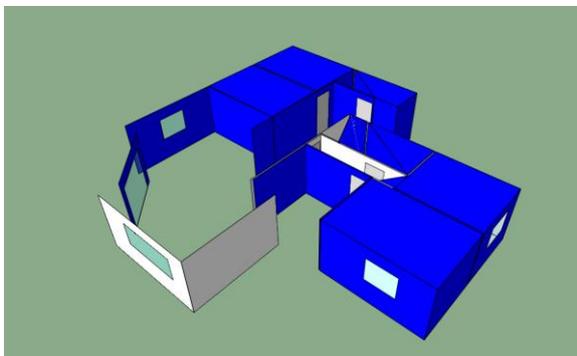


Figure 4: IFC model imported to IES-VE energy simulation software

As mentioned earlier, most of the BIM authoring tools (such as Vasari, Revit by Autodesk (2020), and ArchiCAD by Graphisoft (2019)) offer IFC export/import

features. However, the IFC generation process shall result in a clean IFC file, i.e., it needs to be at least accurate and consistent without any geometrical errors and imperfections. Thus, it cannot be directly usable for such a workflow. The whole process needs to be wisely controlled. For BEPS, the purpose is not just to generate a BIM model, but rather generating a BIM model with a low LOD 100 or 150.

Although there are many geometry error detection tools (e.g., the Geometric Error Detection (GED) tool introduced by Lilis et al. (2015), the IFC Validator implemented by De Laat and Van Berlo (2013), etc.), there should be a step by step guideline on how to generate a clean IFC file to make the process more reliable and less vulnerable to modelling errors. In this line of thoughts, a summary of design guidelines and best practices to generate an accurate and consistent models is listed below, collected from different sources such as Giannakis et al. (2019), and the IES-VE modelling guidelines by IES (2018):

- A coordination with the design team and the BIM manager regarding the required LOD is necessary to keep the model simple, allow a successful IFC generation, and reduce the redundancy and geometrical errors;
- Rooms, Spaces, Zones have to be correctly created and, at each stage, a check needs to be done to ensure they are fully bound and their volumes are correctly represented;
- There should be no air gaps within the full external boundary of the building model and all volumes should be accounted for including ceiling, roof voids and risers;
- Model element properties have to be checked before exporting the IFC file;
- Both IFC2X3 and IFC4 schemas should contain the space boundary (IfcRelSpaceBoundary) entity, which defines the physical or virtual delimiter of a space and its relationship to the surrounding elements. It is important to export this entity when the IFC model is generated.

As per the findings from the conducted tests within the BIM4Ren project on models generated in IFC2X3 vs IFC4 versions, the latter works slightly better, producing less errors. However, since the difference is not that significant, this has

no impact on a recommended use of IFC version in general, as IFC2X3 is still more commonly adopted than IFC4.

It is worth mentioning that, between Revit and ArchiCAD, the most common BIM modelling tools, the latter enables a more precise definition of zones, space sizes and boundaries (inner edge or reference line). Moreover, it allows a manual modification of these boundaries, which makes it a more accurate tool for IFC file generation than Revit. The latter automatically generates these spaces and doesn't allow for manual modifications.

Geometry Verification

The main purpose of solving the interoperability problems between BIM and BEPS is to save time and resources. The most time consuming work in energy modelling is creating the geometry and assigning the main inputs such as construction details, internal gains and operation profiles. Although the BIM designer is provided with a step by step guideline in the previous stage, the geometry verification remains crucial in order to double check accuracy, completeness and consistency of the generated IFC file. There exist many tools that automatically verify the geometry issues mentioned in the IFC Generation section. Some of these tools are:

- **Geometric Error Detection (GED)** tool by Lilis et al. (2015), which is developed in the context of OptEEmAL (2019) and BIMplement (2020) H2020 projects. The GED tool detects clashes, surface errors, and space incorrect definitions in IFC4 files. Detected errors are reported in an XML form. Yet, so far, the tool is not publicly available.
- **The IFC Validator** implemented by De Laat and Van Berlo (2013) is an open source plugin for BIMserver 1.5, limited to IFC2x3tc1. The tool checks for a set of common requirements, among which the geometry of some objects. However, these requirements strictly depend on Dutch norm documents.
- **Advanced model checking and quality assurance tools**, such as Solibri Model Checker by Solibri (2016) and Naviswork by Autodesk (2016), commonly used by BIM professionals, where users can define different checking rules that fit their needs, then create issues that can be reported back to the design teams to fix them. These tools support IFC2 and IFC4 versions. Yet, model checking features are not freely available to the users.
- **BIM Interoperability tools** developed by Autodesk (2019) are integrated into Revit, their modelling software, which comprises different tools to help the stakeholders with their BIM workflows. Model Checker is one of these tools. It enables the creation of checksets to check the model against some rules. This could be handy and fast in avoiding errors before even creating the IFC model or exporting it to another checking tool. As it is a part of Revit, it is not a freeware and cannot be used as a standalone.
- **Simergy** developed by Digital Alchemy (2020) is a BIM-based energy simulation and energy performance analysis tool. It integrates a checker, which verifies the integrity of the model at any point. However the free version is limited in terms of size and complexity of IFC files. The professional version has more features, yet it is paid.
- **IES-VE** developed by IES (2019) has an integrated BIM Navigator (step by step guide), which allows for the verification of the geometry of IFC2x3 and IFC4 files before importing them. The tool doesn't have a free version. Besides, it is more oriented towards the gbXML format.

Geometry Correction

If the IFC file's geometry is not accurate or consistent, errors that have been generated by the tools listed above should be corrected. There are many tools that offer automatic or semi-automatic techniques for geometry correction. Some of them are already listed in the previous section for the geometry verification stage, while some others are dedicated to this stage only:

- **IES-VE** integrates a Modelling fixing algorithm, which heals geometrical errors, caps and fixes missing surfaces and holes. It also fixes the adjacency and 2nd level space boundary problems. Moreover, it has its own modelling tool ModelIT, which allows for a manual fixing of some geometries. However, these algorithms fix geometry issues after being run several times.
- **The IFC Space Boundary Tool (SBT)** introduced by Bazjanac, V. (2020) is a tool that generates required 2nd level space boundary information used in EnergyPlus. It is based on the Geometry Simplification Tool (GST) proposed by Bazjanac (2009), which first simplifies original IFC file and transforms it to gbXML file. The tool, however, is not comprehensive for the generation of 2nd level space boundary information as it misses out corrections to windows in curtain walls, floors and ceilings.
- **The Common Boundary Intersection Projection (CBIP)** is another tool for the generation of 2nd level space boundary information proposed by Lilis et al. (2017). CBIP takes IFC well-formatted files as input (STEP files) and outputs enhanced IFC files (STEP files). This is done in two major stages: (i) it identifies Common Boundaries (CBs) of architectural element pairs (mainly IfcBuildingElement, IfcOpeningElement, IfcSpace and IfcSite) contained in IFC files; (ii) it projects CBs and generates boundary surface topology elements (thermal elements, shading elements, opening elements, air boundary elements), which geometry and connectivity

information are added to the IfcRelSpaceBoundary2ndLevel entity in the IFC files. The tool is not yet publicly available for use.

- **The IFC Space Boundary Conversion tool** is developed by University of Dresden (2017). It transforms 1st level space boundary to 2nd level space boundary entities of IFC files according to the Space Boundary Implementation Guide of buildingSMART. Yet, the tool is limited to IFC2x3.

Energy Data Enrichment

The Enrichment process is relatively easier than the problem fixing phase. Although the IFC file's geometry is accurate and consistent, it still lacks required data for energy simulation, thus it is subject to energy data enrichment. The required input data for a whole-building simulation is listed below (some information is not supported in IFC2x3 or IFC4):

Climate: ambient air temperature, relative humidity, direct and diffuse solar radiation, wind speed and direction;

- Site: location and orientation of the building, shading by topography and surrounding buildings, ground properties;
- Geometry: building shape and zone geometry;
- Envelope: materials and constructions, windows and shading, thermal bridges, infiltration and openings;
- Internal gains: lights, equipment and occupants including schedules for operation/occupancy;
- Ventilation system: transport and conditioning (heating, cooling, humidification) of air;
- Room units: local units for heating, cooling and ventilation;
- Plant: Central units for transformation, storage and delivery of energy to the building;
- Controls: for window opening, shading devices, ventilation systems, room units, plant components;
- Energy costs, incentives, sources information;
- Renewables.

For existing buildings:

- Existing improvements;
- BMS data log or spot checks.

The objective of this process is to complete the missing data, thus it will generate a **complete BEPS Model** ready for simulation. This can be done manually using the list of the Energy modelling tools listed in the next section (Energy Simulation), or as an automated or semi-automated process as listed in this section. In this context, many works have been done in order to enrich the IFC through semantic web technologies, such as the use of ontologies. The latter come down to formal conceptualizations of given domains through entities and relations between them, Staab and Studer (2010). Ontologies are particularly powerful in handling semantic interoperability, i.e., linking vocabularies of different standards and data models and extending them.

Below, a list of ontology-based and non ontology-based works is provided:

- **District Data Model (DDM):** in OptEEmAL project, Costa et al. (2016) propose an ontologybased platform in order to support retrofitting design of energy-efficient districts, facilitate the data integration and ensure interoperability among multiple simulation tools. DDM is defined in this platform, based on the federation of three ontologies: (i) IfcOWL by Pauwels and Walter (2016) to represent building geometry, construction materials, devices and spaces; (ii) CityGMLOWL by Metral and Falquet (2016) to represent the geometry of multiple building envelopes, urban systems, urban areas, etc; and (iii) SimModelOwl introduced by Pauwels et al. (2014) from the work of O'Donnell et al. (2012) to represent data required for energy simulations. The DDM also integrates contextual data added manually to represent weather data, operation schedules of building devices, building typologies, sensors monitoring, energy prices, etc. Practically, after validating the IFC completeness and correctness, IFC files are converted into semantic web data models, mainly Resource Description Framework (RDF) files following the knowledge provided by the ifcOWL ontology. The generated RDF files are then combined with other RDF files describing data from CityGMLOWL and SimModelOWL. Queries are applied on RDF files in order to generate outputs (e.g., Input Data Files or IDF) used by simulation tools (e.g., EnergyPlus).
- **Energy Enhanced BIM (eeBIM):** in the context of eeEmbedded (2017), Kadolsky et al. (2014) propose to enrich an IFC file by integrating additional useful energy information such as climate and occupancy data. The integration of the different domain models is done through an ontology-based approach. In a first step, given a clean IFC file, a semantic web model is generated based on the knowledge provided by the ifcOWL ontology. In a second step, an energy BIM (eBIM) model is generated by using the ontology reasoner and a set of logical rules. The eBIM contains energy relevant information such as outdoor windows, building facades, space boundary information, etc. In a third step, the BIM model is further extended by adding additional energy relevant information such as climate data, occupancy data, material data, etc. This corresponds to the eeBIM, which is ready for energy simulation.
- **Property Enhancer:** this tool is developed in the contest of BIM4Ren project. It is designed to improve the Level of Information (LoI) of BIM files. It can either enrich the IFC files automatically by adding some properties retrieved from external databases or manually by choosing from different renovation packages of existing catalogues.

Energy Simulation

After successfully completing all previous steps, the energy simulation phase is a relatively easy one, depending on the software used for energy simulation, and the methodology to follow. There are two approaches in this phase: (i) either to query from ontology models a compatible energy simulation tool's format such as IDF for EnergyPlus (e.g., the case of OptEEmAL project), (ii) or import the (manually or automatically) enriched IFC file directly to a compatible software as IES-VE and IDA-ICE8. There are many available simulation software. A list can be found in the BEST directory¹.

A list of energy simulation software capable of importing IFC files is provided below:

- RIUSKA (DOE-2 based, Import/Export), Granlund (2010);
- IDF Generator with EnergyPlus, U.S. Department of Energy (DOE) (2020);
- IES-VE, IES (2019);
- IDA ICE, EQUA Simulation AB (2020).

The core tools in the field of BEPS are multi-domain, dynamic, whole-building simulation tools, which provides users with the answers for the predefined KPIs.

CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

This paper presents the main problems limiting the full integration and data exchange between BIM and BEPS models while focusing on the IFC as the main open international standard for the BIM model. Then it gives an overall overview on the main workflow from BIM to BEPS and reviews commonly adopted tools and approaches for each of its stages. The following key points are concluded and will be implemented in future work in the context of the BIM4Ren H2020 project in order to improve energy renovation of residential buildings:

- Energy Simulation KPIs Identification: define a set of KPIs that should be answered by the energy simulation;
- IFC generation: provide a step by step generic guideline to generate a clean IFC file regardless of the used BIM authoring tool;
- Geometry verification: develop BIM-based web services that implement academic prototypes that are not publicly available but identified as relevant for the detection of the correctness and completeness of the IFC file, such as the GED tool;
- Geometry correction: develop BIM-based web services that implement academic prototypes that are not publicly available but identified as relevant for the enrichment of IFC file with 2nd level space information, such as the CBIP algorithm;
- Energy data enrichment: use semantic web technologies in order to enrich the correct and complete IFC file with missing energy related

data. A step forward towards this objective has recently been done by proposing a linked data model for the BIM4Ren project, as described by Bourreau et al. (2020);

- Energy simulation: develop BIM-based web services that exploit required IFC and non IFC data (from a semantic web format) in several energy simulation tools such as IES-VE and EnergyPlus.

To take advantage of the ability to integrate BIM and Building Performance Analysis, BIM models needs to be developed following the proposed workflow. Moreover, such a workflow could be standardized, leading to the development of different interoperable modules that focus on specific issues (i.e., geometry checking, semantic enrichment, etc.), while complying to standardized input/output interfaces. The definition of this modular workflow and its interfaces could be proposed to the dedicated Energy Simulation task force of buildingSmart International. The usefulness and accuracy of the analysis results depend greatly on the quality of the input data.

ACKNOWLEDGMENT

The BIM4Ren project has received funding from the European Union's Horizon H2020 research and innovation program under grant agreement No 820773.

REFERENCES

- Autodesk (2013). Green Building Studio. <https://gbs.autodesk.com/GBS/>, Accessed: 02-07-2020.
- Autodesk (2016). Navisworks. <https://www.autodesk.com/products/navisworks/overview>, Accessed: 02-07-2020.
- Autodesk (2019). BIM Interoperability tools. <https://www.biminteroperabilitytools.com/>, Accessed: 02-07-2020.
- Autodesk (2020). Revit. <https://www.autodesk.com/products/revit/overview>, Accessed: 02-07-2020.
- Bazjanac, V. (2009). Implementation of semi-automated energy performance simulation: building geometry. In CIB W, Volume 78, pp. 595–602.
- Bazjanac, V. (2020). Space Boundar Tool (SBT). <https://gaia.lbl.gov/interoperability/SBT/>, Accessed: 02-07-2020.
- BIM4Ren (2018). European H2020 project. <https://bim4ren.eu/>, Accessed: 02-07-2020.
- BIMplement (2020). European H2020 project. <https://www.bimplement-project.eu/>, Accessed: 02-07-2020.
- Bloomberg, M. R., D. Burney, and D. Resnick (2012). Bim guidelines. New York City Department of Design and Construction, 1–57.
- Bourreau, P., N. Charbel, J. Werbrouck, M. Senthilvel, P. Pauwels, and B. Jakob (2020). Multiple inheritance for a modular bim. In EDUBIM, (forthcoming). Eyrolles.

¹<https://www.buildingenergysoftwaretools.com/>

- buildingSMART (2013). Industry Foundation Classes (IFC). <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/industry-foundation-classes/>, Accessed: 02-07-2020.
- Costa, G., A. Sicilia, G. Lilis, D. Rovas, and J. Izgara (2016). A comprehensive ontologies-based framework to support the retrofitting design of energy-efficient districts. In ECPPM 2016, Volume 2016, pp. 673–681. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- De Laat, R. and L. Van Berlo (2013). IFC Validator. <https://github.com/opensourceBIM/IfcValidator>, Accessed: 02-07-2020.
- Digital Alchemy (2020). Simergy. <https://digitalalchemy.com/products/simergy>, Accessed: 02-07-2020.
- Dong, B., K. Lam, Y. Huang, and G. Dobbs (2007). A comparative study of the ifc and gbxml informational infrastructures for data exchange in computational design support environments. In BS 2007.
- eeEmbedded (2017). European H2020 project. <http://eeembedded.eu/>, Accessed: 02-07-2020.
- EQUA Simulation AB (2020). IDA Indoor Climate and Energy. <https://www.equa.se/en/ida-ice>, Accessed: 02-07-2020.
- Giannakis, G., K. Katsigarakis, G. Lilis, and S. Alvarez-Díaz (2019). Guidelines for OptEEmAL BIM Input Files. https://www.opteemal-project.eu/files/guidelines_for_opteemal_bim_input_files_v11.pdf.
- Granlund (2010). Riuska. <https://www.buildup.eu/en/learn/tools/riuska>, Accessed: 02-07-2020.
- GraphiSoft (2019). Archicad. <https://www.graphisoft.com/archicad/>, Accessed: 02-07-2020.
- Green building XML (2015). gbXML Schema. <https://www.gbxml.org/>, Accessed: 02-07-2020.
- IES (2018). IES Virtual Environment Modelling Best Practice. https://help.iesve.com/ve2018/read_modelling_best_practice.htm, Accessed: 02-07-2020.
- IES (2019). IES Virtual Environment. <https://www.iesve.com/>, Accessed: 02-07-2020.
- Kadolsky, M., K. Baumgartel, and R. J. Scherer (2014). An ontology framework for rule-based inspection of eebim-systems. *Procedia Engineering* 85, 293–301.
- Katsigarakis, K. I., G. I. Giannakis, G. N. Lilis, and D. V. Rovas (2019, jul). An IFC data preparation workflow for building energy performance simulation. In EC3 2019, Volume 1 of Computing in Construction, Chania, Crete, pp. 164–171. University College Dublin.
- Korolija, I. and Y. Zhang (2013). Impact of model simplification on energy and comfort analysis for dwellings. In Building Simulation Conference.
- Lilis, G., G. Giannakis, and D. Rovas (2015). Detection and semi-automatic correction of geometric inaccuracies in ifc files. In 14th International Conference of IBPSA-Building Simulation 2015, BS 2015, Conference Proceedings, pp. 2182–2189. IBPSA.
- Lilis, G. N., G. I. Giannakis, and D. V. Rovas (2017). Automatic generation of second-level space boundary topology from ifc geometry inputs. *Automation in Construction* 76, 108–124.
- Maarten, V. (2016). Ifc to gbxml. <https://github.com/MGVisschers/IFC-to-gbXML-converter>.
- Metral, C. and G. Falquet (2016). CityGMLOWL. <http://cui.unige.ch/isi/onto/citygml2.0.owl>, Accessed: 02-07-2020.
- National Institute of Building Sciences (NIBS) (2017). National BIM Guide for Owners. <https://www.nibs.org/page/nbgo>, Accessed: 02-07-2020.
- O'Donnell, J., R. See, C. Rose, T. Maile, V. Bazjanac, and P. Haves (2012). Simmodel: A domain data model for whole building energy simulation. In Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association.
- OptEEmAL (2019). European H2020 project. <https://www.opteemal-project.eu/>, Accessed: 02-07-2020.
- Pauwels, P., E. Corry, and J. O'Donnell (2014). Representing simmodel in the web ontology language. In ICCCB, pp. 2271–2278. American Society of Civil Engineers.
- Pauwels, P. and T. Walter (2016). ifcOWL. http://ifcowl.openbimstandards.org/IFC4_ADD2/index.html, Accessed: 02-07-2020.
- Sattler, K.-U. (2009). Data quality dimensions. In *Encyclopedia of Database Systems*, Boston, MA, pp. 612–615. Springer US.
- Sefaira (2013). Sefaira. <https://sefaira.com/>, Accessed: 02-07-2020.
- Solibri (2016). Solibri Model Checker. <https://www.solibri.com/how-it-works>, Accessed: 02-07-2020.
- Staab, S. and R. Studer (2010). Handbook on ontologies. Springer Science & Business Media.
- University of Dresden (2017). IFC Space Boundary Conversion Tool. <https://openeebim.bau.tu-dresden.de/openeebim/sbconversion.html>, Accessed: 02-07-2020.
- U.S. Department of Energy (DOE) (2020). EnergyPlus. <https://energyplus.net/>, Accessed: 02-07-2020.

ANALYSIS ON AUTOMATIC GENERATION OF BEPS MODELS FROM BIM MODEL

J. Karlapudi¹ and K. Menzel¹

¹Institut für Bauinformatik, TU Dresden, Dresden, Germany

janakiram.karlapudi@tu-dresden.de

karsten.menzel1@tu-dresden.de

ABSTRACT

The interlinking of enriched BIM data to Building Energy Performance Simulation (BEPS) models facilitates the data flow throughout the building life cycle. This seamless data transfer from BIM to BEPS models increases design efficiency. To investigate the interoperability between these models, this paper analyses different data transfer methodologies along with input data requirements for the simulation process. Based on the analysed knowledge, a methodology is adopted and demonstrated to identify the quality of the data transfer process. Furthermore, discussions are provided on identified efficiency gaps and future work.

INTRODUCTION AND BACKGROUND

The sustainable design of buildings is carried out by initiating an iterative energy analysis commencing in the early design stages of a project (CIC Research Group 2012). Building energy analysis assists engineers, designers and operators on providing more value on comfort and energy efficiency for occupants and building owners respectively (Sun, X.S., 2016). Currently, setting-up energy analysis models for a building at every stage of the project is time-consuming and labour intensive. Thus, BEPS for buildings is rarely introduced for all design stages of projects. However, the interlinking of BIM data with BEPS provides a better solution compared to traditional model generation for BEPS at every stage (Liu et al. 2018, Ramaji & Memari 2016).

BIM models are highly enriched with a large range of information regarding the product and process (Keller et al. 2006). Integrating and linking BIM models to BEPS models leads to significant changes in the design process by introducing building energy analysis in the early stages of the design (Karan et al. 2014, Guzman & Zhu 2014). There are numerous advantages by using an integrated modelling process (Moon et al. 2011, Bazjanac 2008), such as:

- BIM-based energy analysis allows iterative simulations for a wide range of scenarios to be performed within a short period.

- The time saving from the reproduction of the energy simulation model could be spent on simulation and design optimization.
- Changes in the BIM model can be easily reflected in the BEPS model.

Over the past decades, the development of the BIM concept focused on the enrichment and management of domain data along with its interoperability between fields (Karlapudi & Shetty 2019). Currently, the information in BIM models is managed and exchanged with other proprietary software using open standards, such as Industry Foundation Classes (IFC) or the Green Building XML (gbXML) meta-data-model (Ilhan & Yaman 2016, Lee et al. 2012, Crowley & Watson 2000, Kim et al. 2015, Liebich & Wix 2000). The capabilities and popularity of these openBIM meta-data models motivated many AEC software vendors to implement the data exchange features in their tools.

A wide variety of promising attempts are proposed. Their capabilities for automatic generation of energy simulation models were investigated. Most of these generation processes involve a set of conversion tools or plugins such as Geometry Simplification Tool (GST), Green Building Studio (GBS), Openstudio and IFC2SKP. These tools are used to convert IFC or gbXML data schemas to the simulation engine input file formats (e.g. IDF, DOE-2.2, TRNSYS17, etc.). Research from Georgios, N.L., et al. (2017) showed that these tools are restricted to geometrical data generation in simulation tools and more likely to simple geometry. The research also presented the specific constraints and limitations in each transfer process. For example, missing floors and ceilings from the IDF converter tool, ignorance of slabs from IFC file in RIUSKA, etc (Georgios et al. 2017).

In the present work, all these research results are taken into consideration and a methodology which does not involve these meta-data conversions is proposed. Based on the methodology, the research initially focused on the detailed investigation of Information Requirements (IR) for energy simulations and maps these to the IFC and gbXML meta-data schemas. This process can help to identify advanced data

management capabilities for meta- model schemas. The proposed multi-stage methodology for the automatic generation of BEPS models is presented in Figure 1. Further explanations are provided in the coming sections. Furthermore, we present a use case for the application of the proposed methodology. Finally, demonstration results are intensively discussed and summarized.

METHODOLOGY

Figure 1 represents the proposed methodology for data transfer between BIM and BEPS models. The demonstration of data sharing is based on two interoperability file formats such as gbXML and IFC.

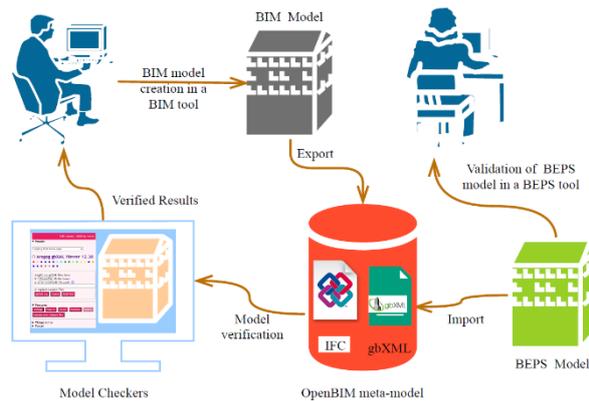


Figure 1: Framework for the demonstration

The results of the Information Requirements Analysis is summarized in Table 1. The table documents the mapping process between BEPS-requirements and the capabilities of openBIM meta-data models such as IFC and gbXML (Note that IFC-parameters are compared to IFC 4 Addendum 2 (2018)).

The IFC meta-model can be equipped with enormous data related to all disciplines of the construction industry (Laakso & Kiviniemi 2012), but all data is not necessary for a specific business process (Menzel et al. 2013). For this purpose, buildingSMART developed View Definitions to reduce and filter the required information to be exchanged for a particular business process. The relationships between the IFC parameters can be attained by the modelling concept called Objectified Relationships represented in Figure 3. The Inheritance Hierarchy is another important modelling principle of the IFC schema. It facilitates the introduction of hierarchies in the BIM model and supports the reuse of modelling concepts for subclasses (ISO 16739-1 2018). Please note that the symbol “XXX” used in Table 1 indicates the name of the IFC object such as the wall, window, door, etc. For example, Qto_XXXBaseQuantities in Table 1 should be interpreted as Qto_WallBaseQuantities, Qto_WindowBaseQuantities, etc. Similarly, the listed parameters of gbXML are considered from the hierarchy structure of the gbXML schema represented in Figure 2.

Table 1: Information Requirements (IR)

INFORMATION REQUIREMENT	PARAMETERS	
	IFC	GBXML
Site Data	IfcSite	Location
Latitude	IfcCompoundPlane	Latitude
Longitude	AngleMeasue	Longitude
Elevation	IfcLengthMeasure	Elevation
Address	IfcPostalAddress	Name
Orientation (w.r.t True north)	IfcGeometricRepresentationContex, IfcDirection	Planar Geometry
Building Envelope (BE)	IfcBuilding	Building
Building Storey	IfcBuidingStorey	Building Storey
Wall	IfcWall	Surface
Roof	IfcRoof	Surface
Floor or Slab	IfcSlab	Surface
Opening	IfcOpeningElement	Opening
Door	IfcDoor	Opening
Window	IfcWindow	Opening
Shading, etc.	IfcShadingDevice	Surface
BE- type	IfcElementType	Surface Type
Distribution Element	IfcDistribution Element	
Geometry	IfcGeometricalRepresentationItemShape	Planar Geometry
Placement	IfcPlacement, IfcAxis2 Placement2D	Rectangular Geometry
BE Dimensions	IfcQuantitySet	
Length	Qto_XBQ - Length	Rectangular Geometry
Width	Qto_XBQ - Width	
Height	Qto_XBQ - Height	
BE Construction	IfcMaterialDefinition	Construction
Thickness	IfcMaterialLayesrSet - TotalThickness	Thickness
Layers	IfcMaterialLayer	Layer
Material	IfcMaterial	Material
BE Properties	IfcPropertySet	
Solar gain	IfcNormalisedRatio Measure	SolarHeat GainCoeff
Thermal mass	IfcProperty SingleValue	
U-value	IfcThermalTransmittanceMeasure	U-Value
R-Value	Inverse of U-value	R-value
Airtightness	IfcVolumetricFlow RateMeasure	Infiltration Flow
Zone	IfcZone	Zone

Legend: XBQ...XXXBaseQuantities

Table 1 (cont): Information Requirements (IR)

INFORMATION REQUIREMENT	PARAMETERS	
	IFC	GBXML
Space	IfcSpace	Space
Area	Qto-SBQ-NetFloorArea	Area
Volume	Qto_SBQ – Volume	Volume
Spatial zone	IfcSpatialZone	
Space Type	IfcSpaceType	SpaceType
Space properties	Pset_Space, etc.	Property details
Building System	IfcBuildingSystem	
Distribution system	IfcDistributedSystem	
Schedules		
Operation schedules	User-defined property sets	Week, and Day Schedule
Occupant schedule	Pset_SpaceOccupancy Requirements	
Weather Data	Pset_OutsideDesign Criteria	
Temperature	IfcThermodynamic TemperatureMeasure	
Solar Radiance	PEnum_Building ThermalExposure	
Wind Speed	IfcLinearVelocity Measure	
Wind Direction	IfcPlanAngle Measure	

Legend: SBQ... SpaceBaseQuantities

The gbXML meta-data model is ‘data-rich’ and capable of describing 500 types of building elements and attributes (gbXML 2020); each component is defined by its ReferenceId. The main concept of this ReferenceId is to create an identification for each component in the schema and to define the relationships between components based on this ReferenceId (Dong et al. 2007).

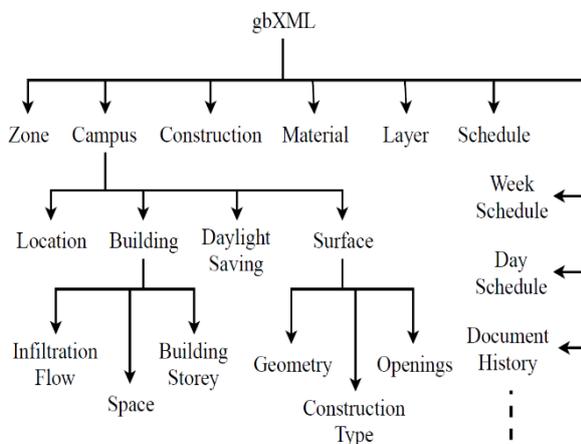


Figure 2: Hierarchy of information organized in gbXML Schema (gbXML, 2020)

Once after the needed requirements are clear, the BIM model is created and is incorporated with all required information to set-up a complex type of energy simulation model. The comprehensive BIM model is exported to the gbXML and IFC file formats. The gbXML file is now imported by the model view checker called Aragog gbXML viewer and similarly, the IFC file is imported by the SOLIBRI Model Viewer.

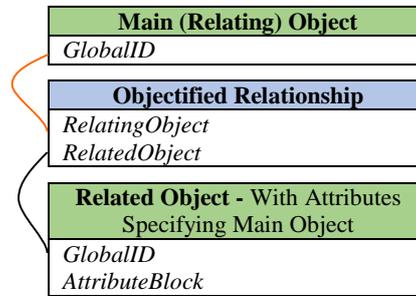


Figure 3: Objectified Relationship (ISO 16739:2013)

The purpose of the model viewer is to identify whether the model data has been exported to interoperability file formats correctly or not. These viewer tools represent the BIM model as a virtual model or analytical model, which is the same representation used for energy simulation. This helps the user to rectify the modelling errors in the initial stage of the data sharing process. After performing the verifications and modifications, the verified IFC or gbXML file is imported by the BEPS application (Bell, D 2014) for energy simulation.

METHODOLOGY DEMONSTRATION

Creation and export of BIM data

A three-storey simple office building is considered for the demonstration of data transfer between the BIM and the BEPS model. The BIM model is represented in Figure 4 was created using the BIM tool Revit (Autodesk. 2019). The BIM model incorporates all the necessary information as defined in Table 1. Each floor of the building is divided into three separate rooms and every room has been assigned by different spaces and its space types. Some of the additional energy parameters like area per person, light and power load density, power schedules, etc are defined based on space types.

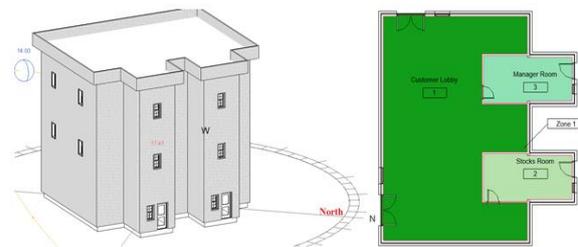


Figure 4: BIM Model

After the BIM model set-up, it was exported to openBIM meta-data file formats with the help of defined export specifications. The export process of modelled information from BIM to gbXML is performed using the category called “Based on Spaces”. This export category facilitates the transfer of data related to geometry, construction, quantities (area and volume), spaces, space types and zones.

Table 2:
BIM to IFC export specifications

EXPORT PARAMETER	SPECIFICATION
General	
IFC version	IFC4 Design Transfer View
File type	IFC
Phase to export	New Construction
Space boundary	2 nd level
Project Origin	Project base point
Additional Content	
The category describes the 2D plans and external linked IFC files. These parameters are not considered since this information not necessary for the simulation process.	
Property Sets	
Export Revit property sets	Enable
Export IFC common property sets	Enable
Export base quantities	Enable
Level of Detail	
Level of detail for element g	high
Advanced	
The category describes the specific parts of the building, families, etc. Such minute data of the element is not necessary for the simulation process.	

The export process to IFC is specified by the parameters presented in Table 2. These export parameters are grouped into five categories, such as general, additional content, property sets, Level of Detail, and advanced. Table 2 summarises the information specification for the export process per category.

Verification of OpenBIM meta-data

After the successful completion of the export process, the data in the meta-data file formats are verified before importing into the simulation software. The intent of this validation process is to verify the quality of the exported data and to evaluate the need for correcting the inconsistencies in either the export or the modelling process. The model viewer tools are used for this verification process. Later on, the verified data is transferred to the BEPS tool IES VE (IES, 2020).

The Aragot gbXML Viewer 12.33 (From Ladybug Tools) is used as a model viewer for the verification of gbXML meta-data. This tool is based on the virtual environment and represents the 3-Dimensional (3D) elements of the building in terms of 2-Dimensional (2D) surfaces at the centre of the element. Figures 5 and 6 represent the export results from the gbXML viewer.

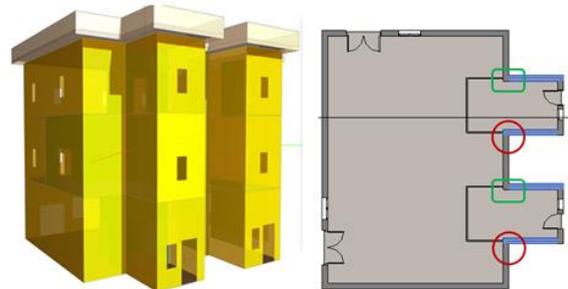


Figure 5: gbXML Model Viewer

From the thorough investigation of exported data in gbXML file, the following issues were identified.

Creation of tiny surfaces for walls, exactly at wall connections (refer Figure 5, 7).

Lack of connection between roof and external walls (refer Figure 6).

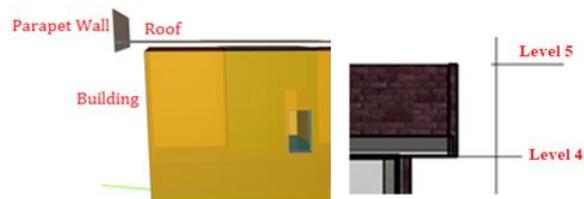


Figure 6: Model Viewer vs BIM Model

In Figure 7 (right image), it becomes clear that several tiny surfaces are created in every storey of the building exactly at the connections marked in Figure 5 (right image). It is even more interesting that the width of these tiny surfaces is exactly equal to the half of the wall thickness. After an in-depth investigation, the reason seems to be the geometrical concept adopted in the gbXML schema. The meta-data schema only reads the co-ordinates for the centerline and internal surface line of the wall and places 2D-surfaces exactly at the centerline of the wall. The co-ordinates of the internal surface line for each wall are used for area calculations.

In the demonstration case, the visualizer creates a 2D surface at the centerline of the walls until centre to centre of the wall connection. The further projected portion of the wall (half thickness) is considered as another wall element. Figure 7 represents the simulation model after the gbXML file was imported to the BEPS application. The tiny surfaces developed in this simulation model represent the projected

portions of the wall at connection points. Furthermore, all these tiny surfaces are treated as shading elements due to the concept defined in the simulation engine. This means, in the BEPS tool elements which are non-room bounding elements (i.e. they are not a part to create a closed-loop to define either room or space) are treated as shading elements.

Another issue observed in the gbXML export process is the incomplete connection between the roof and the remaining building elements in the model. It also identified that some portion of the parapet wall is extended down from the roof level. These issues are represented in Figure 6 (left image). Let's observe the BIM model (right image) in Figure 6. The external wall of the building is limited up to Level 4, as well the parapet wall and Roof construction start from Level 4. It means the base of the roof and parapet wall exists at Level 4, but according to the virtual environment concept, the element is represented as a 2D surface at its centre line. So, the roof surface is created at the centre line and this resulted in a gap between the roof and external wall with a width equal to the half of the roof thickness. Similarly, an extended part of the parapet wall from the roof surface to Level 4 (at the downside of the roof) is generated.

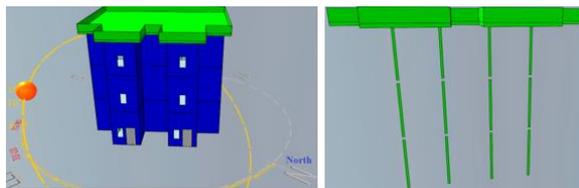


Figure 7: BEPS Model – gbXML import

Figure 7 also shows that the BEPS model imported the geometrical inconsistencies but the gap between the roof surface and the wall was automatically corrected. The BEPS application is adopted in a way that the creation of surfaces for roof, slab or floor is exactly at the position of levels defined in the BIM model.

The SOLIBRI Model Viewer tool is used to import the IFC file for data quality checking and verification of geometrical representations of building components. After in-depth investigations of data in the model viewer tool, it could be verified that all data was completely and successfully exported to IFC.

However, data were exported to IFC according to the BIM tool's proprietary data format. For example, the space type is defined as a typed spatial element in the IFC schema. In the exported IFC file the space type is represented as a property to space. The parapet wall and the roof extension (roof offset) are modelled in Level 4 of the building (BIM model). However, this needs to be treated as a shading device for energy analysis purposes. Nevertheless, these elements are represented as wall elements (for parapet wall) and roof elements (for an extended part of the roof) in the

Model Viewer (see Figure 8 – left image). It should be noticed that IFC is capable to model shading elements (using IFCShadingDevice).

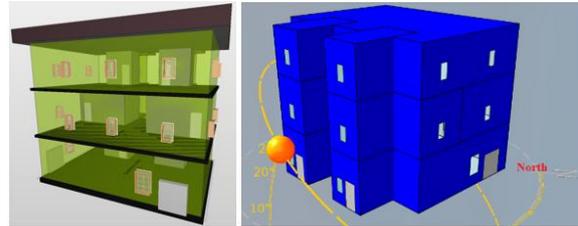


Figure 8: IFC - Model Viewer & BEPS Models

The data transfer process mostly depends on the BIM tool's proprietary data format. This causes inconsistencies in the generation of BEPS model. Figure 8 (right image) represents the BEPS model as stored in the simulation software. The model shows that shading devices are not part of the simulation model. A comprehensive discussion of these results is presented in the next sections.

BEPS model generation and validation

After the completion of openBIM data verification, the information is transferred to BEPS. The intent of the next verification step is to evaluate the quality of imported data and the data import capabilities of BEPS from gbXML and IFC. This validation process is carried out based on four different concepts and those are explained more comprehensively below.

Import statics:

The BEPS application generates a small report after every import of the BIM model and delivers import statistics. This report mainly focuses on the representation of the area and volume of each room or space, which are imported to BEPS applications. It also explains about surfaces, which define the room, and intersections between these surfaces. The report also provides some statistics regarding the number of surfaces and spaces of the BIM model, that were imported successfully. A comparison of volume-data between the BIM model and the BEPS model for the transfer process has been carried out. The difference in volume is presented in terms of percentage of volume difference with respect to the BIM model.

It can be observed that the volume difference is more than 10% for all the room types in the BEPS model. The increment of room volume in the BEPS model results from the volume calculation methodology. In the BIM model, the volume of the room was calculated based on the internal surfaces of the room bounding elements. It means for calculations only the internal distance between walls, roof and floor was considered. During the gbXML import process, the simulation tool imports co-ordinates related to both the centerline and the internal surface line of the element and places 2D

surfaces at the centerline. Similarly in the IFC import process, the simulation tool imports co-ordinates for the centerline of the elements. For volume calculations, the BEPS application uses the centerline method. It calculates the area between centre to centre of walls and multiplies this area with the height difference between levels for volume calculations.

Model Geometry and Orientation:

The geometry, location and orientation of the BEPS model generated from the gbXML import process can be also shown in Figure 7. The site location and all spaces of the building have been successfully imported to the BEPS application. Based on site location details, weather data can be acquired automatically within the BEPS application. The orientation of the building was also imported successfully (see the comparison between Figure 4 and Figure 7). The only issue results from the multiple tiny surfaces, which are defined as local shading devices created in each level (see Figure 7).

The BEPS model resulting from the IFC import process is shown in Figure 8 (right image). The data transfer methodology using IFC successfully imported the geometry, space and location details of the building to the BEPS application. However, the orientation of the BEPS model is different from the BIM model which can be understood by comparing Figures 4 and 8 (right image). The original orientation of the building is mentioned as 320 degrees to true north but the BEPS model is oriented at an angle of 40 degrees to the true north. An error regarding the direction of the model rotation in the IFC file causes this anomaly. The roof extension and the parapet wall are not imported from the BIM to the BEPS model, even though the details regarding these elements are contained in the IFC file. This is due to the fact that those elements are not bounded to any space in the BEPS model.

Construction details

The investigation of construction parameters in the BEPS model verified that all construction type names and thermal transmittance values (u-value) for each element were successfully imported from gbXML. However, the thickness and layered structure of construction elements were not imported. Information about element layers, thickness and material specifications modelled in BIM were successfully exported to gbXML; but the same is not being imported to the BEPS model from gbXML. Thus, the simulation application is failing to successfully import these construction details from gbXML files.

The evaluation of IFC-tools demonstrates, that these tools are capable to transfer construction details of all elements. The evaluation of the IFC import process to the BEPS model shows that the BEPS application is

not importing any construction details from IFC. Literally, nothing has been observed in the construction parameters of the BEPS application.

Thermal Profile

In the gbXML data transfer process, the BEPS model successfully imported all space types defined in the BIM model. It also imported building services systems (HVAC) defined for each zone from the gbXML file. The simulation model did not import all other energy settings and information mentioned in the BIM model. Instead, it redirected to the information defined in the BEPS application library for energy analysis based on space types imported. For example, the space type "Bank Customer Area" has been assigned for a space called customer area in the BIM model, the BEPS model verified this imported space type and selected a space type called "Retail and Office" from its library. The energy settings like air exchange, internal gains, space condition, etc. are considered according to space type Retail or Office (in BEPS tool library).

The defined schedules for occupants and building operations (lighting, power supply) for each space types are not imported to the BEPS model. Generally, all these schedules are based on the space type and are editable too. It means, all these schedules are different from building to building even though the space type is the same. Thus, the BEPS application makes this schedule definition a user-defined task. Similarly, all imported data is editable, and it facilitates the user to modify and edit the information at any stage of the simulation.

Like the gbXML import process, the BEPS model successfully imports space types modelled in the BIM model. With the help of these space types, the BEPS application redirects to its libraries and assigns similar space types to the spaces in the BEPS model. We wish to highlight that the BEPS application interprets the space types differently, compared to the space types modelled in the IFC file, even though it is defined as a property to space. It thus contradicts to the IFC schema.

RESULTS AND DISCUSSION

The research started with the intent of evaluating the level of seamless data transfer from the BIM to BEPS models. This paper introduces a methodology to investigate and evaluate the interoperability between BIM and energy simulation with the help of IFC and gbXML file formats. The validation of this methodology was carried out using an example demonstration case. The quality and efficiency of the methodology are assessed based on the generated BEPS model data quality and preciseness.

The proposed methodology is applied to a simple use case model of a three-storey office building. The results from this evaluation show that both IFC and

gbXML meta-data schemas have their own advantages and disadvantages. Direct data sharing from BIM to BEPS models based on openBIM schemas is still not efficient because of the adopted concepts in both BIM and BEPS tools. It is understood that both tools use the same knowledge but the interpretation of this knowledge is different in the various applications. One can conclude that the introduction of further, more advanced technologies, such as integrated, real-time monitoring of occupants and devices seems still to be difficult (Menzel et al. 2008), since sharing the necessary basic information is still error-prone.

Construction and thermal profiles details are either inconsistent or completely failed to transfer. Especially, this is because of the lack of enough capabilities from the end tool to import data from the meta-model schemas. Apart from the end BEPS tool capabilities, gbXML schema causes issues in exporting building geometry (e.g. tiny surfaces in the model).

Another conceptual problem identified in the BEPS application is a lack of import capabilities for elements which are not bounded by any spaces. Since, e.g. all the shading elements are not bounded by any space, this is another unresolved problem in the import processes.

Furthermore, the BEPS model imports space types assigned to spaces as property. However, the information is overwritten with standard values and thus contradicts values defined in the IFC schema. Technically, such space type information could not only help BEPS applications to run several competency checks according to a different standard of specifications but could also be exploited in more advanced scenarios for energy service provision (Allan et al. 2009). This means there exist another case for future activities to improve the interoperability of software applications towards the development of digital twins in the AEC industry.

SUMMARY AND FUTURE WORK

Along with the comprehensive analysis of the methodology and the results from the demonstration process, a general review on the software interoperability in the AEC industry was carried out. It became clear that a diverse spectrum of information and different expertise in the building modelling process exists and must be harmonised. This diversity makes the process complex because of different knowledge interpretations about the same subject in different domains. The complete understanding of these interpretations is pivotal. It seems that such 'symptoms' are observed over more than a decade when comparing the result of this work with earlier work published (Keller et al. 2006).

However, it also became clear through the presented methodology that detailed work on attribute level is required to improve the interoperability between data models.

The probable solution is an in-depth investigation of approaches to use the semantic web and linked data concepts to reduce the need for human interaction required to harmonise openBIM data and to provide an opportunity to perform (semi)automated updates, changes and corrections to the data (Karlapudi et al. 2020).

Furthermore, the development of new workflows which would enable the engineers to transform BIM to BEPS models outside the proprietary authoring tools is required. Finally, it is also important to integrate further external data, e.g. climate data, material data from material manufacturers, occupant behaviour, sensor data, energy templates for decision making and information about Pre-fabricated components.

As said above, one possible solution is the adoption of semantic web technologies into the AEC industry. Such technologies may enable the description of the information in several distinct ways and make it possible to connect to each other with the help of connected graphs. Future research is focusing on achieving efficient data interoperability between AEC applications through the implementation of semantic web technologies and the Linked Data Paradigm (DIN EN ISO 21597-1. 2018).

REFERENCES

- Allan, L., Menzel, K. 2009. Virtual Enterprises for Integrated Energy Service Provision, IFIP Advances in ICT, vol. 307, pp: 659-666.
- Autodesk. 2019. RevitTM, <<https://www.autodesk.com/products/revit/overview>>.
- Bazjanac, V. 2008. IFC BIM-based methodology for semi-automated building energy performance simulation, Berkeley.
- CIC (Computer Integrated Construction) Research Group. 2012. BIM Planning, Accessed July 5, 2018, <https://www.bim.psu.edu/>.
- Crowley, A.J., Watson, A.S. 2000. CIMsteel integration standards, release 2: Overview, Leeds.
- DIN EN ISO 21597-1. 2018 (Draft). Information container for data drop – Exchange specification – Part 1: Container, ISO.
- Dong, B., Lam, K.P., Huang, Y.C., Dobbs, G.M. 2007. A comparative study of the IFC and gbXML informational infrastructures for data exchange in computational design support environments geometry information, Building Simulation 2007, Syracuse, pp. 1530-1537.

- gbXML. 2020. The Green Building XML schema, <<https://www.gbxml.org/>>, Accessed July 5, 2018.
- Georgios, N.L., Georgios, I.G., Dimitrios, V.R. 2017. Automatic generation of second-level space boundary topology from IFC geometry inputs, *Automation in Construction*, pp. 108-124.
- Guzman, E., Zhu, Z. 2014. Interoperability between building design and building energy analysis, *Computing in Civil and Building Engineering*, Reston, pp. 17-24.
- IES. 2020. VETM, <<https://www.iesve.com/>> Accessed July 5, 2018.
- IFC4 Add2 TC1. 2018. Industry Foundation Classes 4.0.2.1, buildingSMART International Limited, <https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEA SE/IFC4/ADD2/HTML/>, Accessed July 5, 2018.
- Ilhan, B., Yaman, H. 2016. Green building assessment tool (GBAT) for integrated BIM-based design decisions, *Automation in Construction*, pp. 26-37.
- ISO 16739-1:2018. Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries – Part 1: Data schema, ISO.
- Karen, M.K., Douglas, N. 2014. *BIM in Current and Future Practice*, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
- Karlapudi, J., Menzel, K., Tötma, S., Hryshenko, A., and Valluru, P. 2020. Enhancement of BIM data Representation in Product-Process Modelling for Building Renovation, IFIP 17th International Conference on Product Lifecycle Management, Rapperswil, Switzerland.
- Karlapudi, J., Shetty, S. 2019. A methodology to determine and classify data sharing requirements between OpenBIM models and energy simulation models, 31st Forum Bauinformatik, TU Berlin, Berlin. Pp. 331 -338.
- Keller, M., Scherer, R., Menzel, K., Theling, T., Vanderhaeghen, D., Loos, P. 2006. Support of Collaborative Business Networks in AEC, *Journal of Information Technology in Construction*, vol. 11, pp. 449-465.
- Kim, J.B., Jeong, W., Clayton, M.J., Haberl, J.S., Yan, W. 2015. Developing a physical BIM library for building thermal energy simulation, *Automation in Construction*, pp. 16-28.
- Laakso, M., Kiviniemi, A. 2012. The IFC standard: A review of history, development, and standardization, *ITcon 17*, pp. 134-161.
- Lee, S., Liu, Y., Chunduri, S., Solnosky, R.L., Messner, J.I., Leicht, R.M., Anumba, C.J. 2012. Development of a process model to support integrated design for energy efficient buildings, 2012 ASCE Int. Conf. on Computing in Civil Engineering, Reston, pp. 261-268.
- Liebich, T., Wix, J. 2000. IFC technical guide: Enabling interoperability in the AEC/FM industry, Oakton, VA: International Alliance of Interoperability, Modeling Support Group.
- Liu, Y., Messner, J.I., Leicht, R.M. 2018. A process model for usability and maintainability design review, *International Conference on Architectural Engineering and Design Management*, 14 (6), pp. 457-469.
- Menzel, K., Weise, M., Liebich, T., Valmaseda, C. 2013. Capabilities of IFC 4 for Advanced Building Performance Management, *Contributions to Building Physics*, Vienna Univ. of Technology, Vienna, Austria, pp. 467-474.
- Menzel, K., Cong, Z., Allan, L. 2008: Potentials for Radio Frequency Identification in AEC/FM, *Tsinghua Science and Technology*, Vol. 13, Iss. S1, pp. 329-335.
- Moon, H.K., Choi, M.S., Kim, S.K., and Ryu, S.H., 2011. Case Studies for the Evaluation of Interoperability between A BIM-based Architectural Model and Building Performance Analysis Program, *International Building Performance Simulation Association*, pp. 14-16.
- Ramaji, I.J., Memari, A.M. 2016. Interpreted information exchange: Systematic approach for BIM to engineering analysis information transformations, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 30 (6).
- Sun, X.S. 2016. Investigating Building Information Model to Building Energy Model data transfer integrity and Simulation results, Canada.

A REVIEW ON COUNTRY SPECIFIC DATA AVAILABILITY AND ACQUISITION TECHNIQUES FOR CITY QUARTER INFORMATION MODELLING FOR BUILDING ENERGY ANALYSIS

A. Malhotra¹, J. Bischof², J. Allan³, J. O' Donnell⁴, T. Schwengler⁵, J. Benner⁶ and Gerald Schweiger⁵

¹RWTH Aachen University, Germany, ²Institut Wohnen und Umwelt, Germany

³EMPA, Switzerland, ⁴University College Dublin, Irland

⁵TU Graz, Austria, ⁶Karlsruher Institut für Technologie, Germany

ABSTRACT

This paper addresses the increasing number of disparate data resources used for urban modelling. The objective of this work is to provide a standardized approach for processing these resources for urban energy modelling studies. This paper details the approach of a collaborative project to standardize categorization, acquisition and processing of diverse datasets for energy modelling and simulations are explained. Furthermore, based on the data categorization, this research provides an overview of the country-specific data availability and sources (for Austria, Germany and Switzerland) required for urban energy simulations. The result is a standardized structure for information exchange which is published in an extendable online template.

KURZFASSUNG

Diese Arbeit thematisiert die wachsende Anzahl unterschiedlicher Datenquellen, die für urbane Modellierungen zum Einsatz kommen. Es wird eine standardisierte Methode entwickelt, welche die Verarbeitung und Nutzung dieser Daten in der energetischen Stadtmodellierung unterstützt. Dafür werden Details eines kollaborativen Projektes erläutert, das sich mit der Standardisierung der Kategorisierung sowie der Erfassung und Verarbeitung verschiedener Datensätze für die Energiemodellierung und Simulationen befasst. Basierend auf der Datenkategorisierung gibt diese Arbeit einen Überblick über die länderspezifische Datenverfügbarkeit und die für urbane Energiesimulationen erforderlichen Quellen für Österreich, Deutschland und die Schweiz. Zudem wird eine erweiterbare Online-Vorlage für eine standardisierte Austauschstruktur für Informationen zur Datenverfügbarkeit veröffentlicht.

INTRODUCTION

The proportion of the global population living in cities is expected to increase from 55% in 2018 to 68% in 2050 (UN DESA, 2018); therefore, the development of urban planning tools is of growing importance. The necessity to make cities cleaner and more resource efficient requires an in-depth understanding of the impact of energy production, distribution and usage,

not just across different energy sectors but also at different scales in order to compare and assess different energy retrofitting options and novel energy system configurations.

In the field of building energy demand modelling, past studies and literature distinguish between “top-down” and “bottom-up” approaches (Reinhart & Davila 2015, Sola et al. 2018). Top-down approaches determine the energy demand in an aggregated form, for example, the aggregated demand of a region is distributed across the buildings it contains; however such approaches are unsuitable for detailed investigations of integrated energy supply and demand scenarios. On the other hand, bottom-up modelling approaches, discussed in Swan & Ugursal 2009, are classified into two categories: 1) engineering and 2) statistical. Engineering models estimate the energy demand of buildings based on physical models of energy and mass flows in and around buildings, and profiles of occupancy and equipment usage. Statistical models on the other hand leverage regression analyses in order to determine correlations between building energy consumption, defined energy end-use categories and climatic conditions (Reinhart & Davila 2015, Sola et al. 2018).

A significant part of both bottom up modelling approaches require energy modelling of individual buildings at a city-quarter or city level. Meaningful or sufficiently accurate modelling of the thermodynamic behavior of the target system potentially requires significant quantities of information for each building. A large number of simulation inputs need to be derived from data resources; therefore, it is critical that these resources be categorized according to the desired modelling objectives.

This paper aims to detail an approach that standardizes the collection and processing of the diverse datasets for energy performance. The work is part of a collaborative project, under the umbrella of the International Building Performance Simulation Association (IBPSA) (Wetter, et al., 2019). The study introduces several universal data categories to facilitate and harmonize data collection for energy performance simulation at an urban scale. This data

can then be used to populate or define data models such as City Geographical Modeling Language (CityGML) (Gröger et al. 2012). This paper introduces a concept of primary, secondary and tertiary data categories: where primary data categories comprise the information that can be directly used in a building simulation (e.g. geometric features), whereas, secondary data includes classifiers, such as building usage and tenure that in combination with statistical information (tertiary data) compliment the primary data or inputs. Secondary data in combination with tertiary data can enrich individual data records. One main purpose of secondary and tertiary data is the creation of archetypes that can infer missing input data.

Within this paper, the definition of different data categories is based on a case study covering available data identified in Germany (D), Austria (A) and Switzerland (CH). Collectively these are labelled DACH. The categorizations are more refined than a similar approach taken in (Reinhart & Davila, 2015), where the creation of building energy models for districts is subdivided into three tasks: Data input, thermal modelling and validation. In many countries and cities, digital building stock models exist but typically lack consistency in terms of formats and quality of data. Different data are gathered in multiple ways in the 'Data Acquisition' phase. Since much of the data sources can be inaccessible to energy modelers due to access restrictions them, this paper broadly defines the most prominent data publishers for the DACH nations (to the best of each authors knowledge). The next stage involves structuring the data into standardized 'Data Models' and the paper provides an overview of some of the commonly used data models for urban energy simulation. The information about the resolution of the data models along with their availability and acquisition (based on the identification of the data sources for the DACH countries) is discussed in this paper. Furthermore, as a part of the next steps, the authors aim to identify major gaps and problems with the DACH specific data for usage in urban building energy simulation. As a result of the current study, a comprehensive universal data categorization structure will be published as a template to store, manage and exchange information for multiple countries. This template can be extended for multiple countries, data types and its sources.

This paper is structured as follows: The Data Categorization section highlights the identified categories and datatypes associated with city quarter modelling; the Data Models section describes the data formats used for energy modeling and simulations; the Availability and Acquisition of Datatypes section discusses the availability and resources of these datatypes. The ultimate contribution of this work, a Universal Data Categorization Template is then presented. This is followed by the Conclusions and Future Work section.

DATA CATEGORIZATION

Starting from building level to an urban scale simulation, the amount of required relevant data for energy analysis can differ with respect to the considered data model and/or simulation environment. Thus, the data used for such simulations largely vary in resolution, usage and management. In order to define the data sources, this paper identifies three major data types:

- Primary (P)
- Secondary (S)
- Tertiary (T)

Table 1 provides an overview of identified relevant data categories, their descriptions, use cases and types.

DATA MODELS

For energy related simulations on city-quarter or city level, a lot of information about each building is needed to replicate the thermodynamic behavior of the system with sufficient accuracy. Such models require position, orientation, geometrical shape, data describing the building's constructional properties and physical state, the structure of its exterior shell (such as size and position of windows), its usage, internal energy gains and HVAC systems. Various data models are available for representing building related information in a machine-readable format, partly or fully supporting the aspects mentioned above. Besides, open and (nationally or internationally) standardized models, some proprietary models also exist but are not regarded in this paper. Data models originating from the Building Information Modelling (BIM) domain, such as Industry Foundation Classes (IFC) (ISO 16739, 2015, Bazjanac & Crawley, 1997) or Green Building XML (gbXML) (Dong et al. 2007), are able to store properties related to the energy performance of a building. IFC is mainly used in the architecture and construction domain but for energy related application it is mostly used in context of academic projects. In contrast, gbXML has been specially developed for energy related applications, and has functional interfaces to simulation environments such as TRNSYS or EnergyPlus (Malhotra et al. 2019, Geiger et al. 2019).

Category	Description	Use	Type
Building footprints	2D polygons of the building footprint	Geometric calculations and estimations involving individual and gross floor area	P
Building height	Height of the building. Often comprised of two measurements - eave height and ridge height	Used to construct 3D volumes and surfaces from 2D data	P
3D building model	3D volumetric model of the building. Varying levels of detail.	Provides geometric information about the outer shape of the building	P
Digital elevation model	Evenly spaced elevation values referenced to a projection or coordinate system	Determines the horizon line and location of shading objects for radiation calculations	P
Built form	Descriptive information about the relationship with other buildings	Determines the boundary conditions for simulation by identifying shared and exposed walls	P
Thermal envelope (wall, roof, floor, glazing types)	Detailed information on the construction and materials used in the elements of the building envelope	The thermos-physical properties of the building elements are used in the simulation to calculate heat flows	P
Building age	Age of the building or time since the last retrofit	Infer typical building materials based on regulations at the time of construction/refurbishment	S
Building use	Usage category of a building	Used to determine internal schedules, temperature and humidity set points required for simulation	S
Occupant Composition	Detailed information about the number, type, age-group of the inhabitants of the building	Used to determine load schedules specific to an occupant type	S
Tenure	Provides information on whether the house is owner occupied, rented or is a social housing	Used to infer information about construction, refurbishment status or scheduling	S
Building Energy System	Existence and parameters of energy systems (Renewables, HVAC, Lighting and DHW) in the building.	Used in calculations to determine the efficiency of the energy system and resulting demand profiles	P/S
Address Data	The street address of a building	Can be used for aggregation, clustering and linking. Address data could also be used to infer information about the age or use of a building.	S
Building Typology	Parameterized buildings models representing a specific category	Used to populate the parameters of missing or questionable data records	T
Stock Development	Rates for new building construction, building demolition and/or building refurbishment.	The stock development data acts as an independent parameter that 'drives' a possible stock development forecast.	T
Energy Generation and Distribution	The availability and description of district heating or external energy resources (e.g. CHP) as well as grid accessibility.	Used to evaluate the reliance and influence of the building on external energy systems	NA
Weather Data	Environmental variables experienced by the building over the simulated period	Directly used in the simulation to determine boundary conditions and heat flows	P

Table 1: Overview of identified relevant data categories, their descriptions, use cases and types for DACH countries.

Moreover, many different standardized building data formats originate from the Geographical Information System (GIS) domain. National cadastral data formats, such as the German Authoritative Cadastral Map Information System (ALKIS) (AdV 2012) or Norm based Exchange Platform (NAS) (AdV 2004), and the internationally used OpenStreetMap (OSM) format are frequently used but represent only a few building properties related to energy. The international GIS standard CityGML and the European standard INSPIRE Building are potential better suited in this regard. Besides the representation of geometric and non-geometric properties several energy related building properties like year of construction, building function, roof type or floor structure are also supported.

The CityGML standard is extensible and its functionalities can be extended through Application Domain Extensions (ADE) (Gröger et al. 2012, Biljecki et al. 2018). ADEs enable extensions of existing CityGML classes with pre-defined properties or definitions of completely new classes that relate to the basic standard. Currently, such an extension supporting all energy relevant aspects mentioned above is under development as the CityGML Energy ADE (Agugiaro, et al. 2018).

AVAILABILITY AND ACQUISITION OF DATATYPES

Despite having well defined data models, it is still a challenge to populate the attributes. Chen, et al. 2018 evaluated the availability of public datasets in San Francisco and found that there was a lack of common keys to enable mapping of data to CityGML. Rosser, et al. 2019 also details how datasets in the UK were mapped to the attributes of an EnergyADE file using two case studies. Nevertheless, the usability of CityGML is at times questionable. Braun, et al. 2018 provides an overview of some of the challenges, such as missing data, inaccuracies and geometric inconsistencies, faced when creating energy models from a CityGML model of Stuttgart, Germany.

The approach taken for data acquisition is highly diverse and depends on the kinds of data available in the country of focus. Although several data sets, with respect to their availability types, exist, some cannot be utilized for scientific usage as they cannot be accessed due to legal restrictions (usage agreements). Therefore, not only the data availability but also the legal data availability type restricts the availability to the user. Some of the most common availability types are summarized below.

Data availability types (DATs)

- Open - Dataset can be generally used free of charge for any purpose (Auer, et al., 2007)
- Public Sector Information (PCI) and Open Government Data - A charge may apply for certain usage e.g. commercial usage (Deutsche Post, 2019)
- Academic - Data can be used free of charge for research purposes (often the case for PCI data)
- Commercial - Data use is licensed for a fee
- Application restricted - Data can only be used with certain applications (e.g. Google Earth)
- Private - Data is not accessible to outsiders

Within the scope of this paper, data holders, for Germany, Austria and Switzerland, who are responsible for the geo-information data and its accessibility are discussed in the sections below. However, different countries may have different techniques and accessibility restrictions with respect to the data. It is therefore the responsibility of countries/users adopting this approach, to identify the accessibility restrictions that apply to them.

Data holders and accessibility

Several institutions in Germany, Austria and Switzerland hold data relevant to building performance simulation. These institutions can be divided into two groups; Governmental and Private Organizations.

Governmental Organizations

The following subsections describe the governmental data holders and initiatives in Germany, Austria and Switzerland.

Germany

In Germany three types of governmental data holders exist. These are the Federal Republic, the 16 Federal States and the more than 10,000 Municipalities (DESTATIS, 2020). For example, in the case of building polygons, the municipality data is aggregated to federal state level (AdV, 2020).

Federal Republic of Germany: Geo-datasets of the federal government are partly open, especially datasets with poorer resolution such as elevation models with a grid size of over 200m, or are commercially available (BKG, 2020). Two data portals offer access to geo-data on the level of the federal republic and the web access is available by the 'Bundesamt für Kartographie und Geodäsie' (BKG, 2020) and GovData (Open Government Data, 2016).

At the Federal State level, building-geo-datasets of Hamburg, North-Rhine-Westphalia, Thuringia, Berlin and Brandenburg are open but the datasets of the other states are commercial. These datasets can be accessed via each federal state's geo-data web portals. While some municipalities offer online access to their geo-data most do not. Data might be provided on request but each request is case specific.

Austria

Data holders are state, federal states, cities and municipalities. The state offices and their downstream agencies are responsible for national data sets, such as the digital cadastral map. Due to laws in the respective federal states (e.g. in the field of nature conservation) the federal states are responsible for a large amount of geodata. The initiative "geoland.at" started more than 15 years ago and is a geodata network across all federal states (Geoland, 2020). In 2011, the Federal Chancellery and the City of Vienna established Open Government Data in Austria. The federal states, some federal ministries and cities are the driving force behind this initiative. The basemap.at project initiated by the federal states is a prominent example of functioning Open Data in Austria (Basemap, 2014). In addition to the Open Government Data Portal of Austria (data.gv.at), the INSPIRE portal (inspire.gv.at) provides another access point to (partly but not completely open) geodata of Austrian administrations. Both portals are hosted by the European Open Data Portal opendataportal.eu (European Data Portal, 2019). Nevertheless, there is still a need for action in Austria, such as the provision of a nationally harmonized building model (LOD1,2,3), which is especially essential for energy-relevant analyses.

Switzerland

The largest Swiss datasets on buildings are the Federal Register of Buildings and Apartments (GWR) and the Federal Data of the Statistics of Buildings (GWS). In GWR, each individual building is geometrically represented by its centroid and associated with information for instance on usage, number of floors or heating systems. GWS summarizes building characteristics and information from the population and household statistics, such as occupation and age groups for hectare sized grid cells. Both datasets are compiled and controlled by the Swiss Federal Office of Statistics. Access to these datasets is provided only by request and can only be used for statistical work, research, planning and legal obligations (FSO, 2020). Detailed building footprints are part of the official cadasters, which are compiled and made available by cantons or municipalities. The data is often openly available from local sources. Less detailed building footprints are also openly available from user-generated contents such as OpenStreetMap. Most geographical datasets are controlled by the Swiss

Federal Office of Topography, there are multiple openly free datasets available but others, such as 3D building geometries are commercial and must be ordered (Bundesamt für Landestopographie, 2020). In 1979 the energy departments in each of the Swiss cantons came together and formed the *Energie direktoren konferenz (EnDK)*. One of the main instruments of the EnDK is "Der Gebäudeenergieausweis" (GEAK), which is an energy performance assessment and certification tool for buildings (EnDK, 2020). The raw data used in the assessment and issue of GEAK certificates is not openly available and needs to be requested.

Private Organizations

Two kinds of private organizations that hold building simulation relevant geo-datasets were identified in all DACH countries. The first are the 'Map Providers' and are for example OpenStreetMap (OSM) and Google. While OSM data is open, Google's data is application restricted. The second type of private organization that hold building simulation relevant geo-data-sets is the 'Building Service Providers'. Collectively these companies provide a number of different building related services. Examples are Insurances, Housing Companies, Utility companies or the postal service. These data sets are predominantly private but sometimes commercially available (Deutsche Post, 2019).

UNIVERSAL DATA CATEGORIZATION TEMPLATE

An online template presenting data categorization (as discussed in section data categorization and in Table 1) and country specific data availability (currently for Austria, Germany and Switzerland as discussed in the last section) can be found under: <https://ibpsa.github.io/project1-wp-2-1-cim-gis/>. One of the main aims of this template is to assist the processing country-specific data for both researchers and practitioners. The online template will include the information about the categories and sources of the data that can be used for energy simulations. Furthermore, the authors would like to encourage people to regularly update the database for different countries. A detailed description of how to contribute can be found on the website above.

CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

Globally, the state of being available of the open and country-wide building polygon data is an important requirement for city modelling but is seldom available. Such building geo data should at least be available free of charge for research and scientific purposes. The quality and reliability of the building geo data provides further cause for concern. Another big problem faced by the community regards the non-

homogenous nature of the data attributes provided by different federal states. Currently, every federal state has its own standard for the available information. A factor that can result any number of ad-hoc properties or concept definitions such as building usage categories which in many cases do not provide a clear classification of the buildings under consideration. Nationwide and EU-wide standards should be created in order to create more reusable geographical building information attributes. The formulation of the Universal Data Categorization Template as presented in this paper provides an important step forward on the way to standardization. This template includes different data categories, datatypes and data sources for urban scale information modeling and simulations. However, further work foreseen by the authors is required both on national and international level.

ACKNOWLEDGEMENT

This work emerged from the IBPSA Project 1, an international project conducted under the umbrella of the International Building Performance Simulation Association (IBPSA). Project 1 will develop and demonstrate a BIM/GIS and Modelica Framework for building and community energy system design and operation.

REFERENCES

- Agugiario, G., Benner, J., Cipriano, P., & Nouvel, R. (5. March 2018). The Energy Application Domain Extension for CityGML: enhancing interoperability for urban energy simulations. *Open Geospatial Data, Software and Standards*.
- Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV). (2020). Die amtlichen Hausumringe Deutschland (HU-DE). Abgerufen am 14.02.2020 von <http://www.adv-online.de/Adv-Produkte/Liegenschaftskataster/Amtliche-Hausumringe/>
- Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV). (2012). *ALKIS® Grunddatenbestand und länderspezifische Inhalte*. AdV.
- Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV). (2004). *Erarbeitung eines Qualitätssicherungssystems für die Geodaten des amtlichen Vermessungswesens*. Arbeitskreis Informations- und Kommunikationstechnik.
- Auer, S. R., Bizer, C., Kobilarov, G., Lehmann, J., Cyganiak, R., & Ives, Z. (2007). DBpedia: A nucleus for a web of open data. *Lecture Notes in Computer Science, vol 4825* (S. 722). Heidelberg: Springer, Berlin, Heidelberg.
- Basemap. (2014). *basemap.at*. Von https://www.basemap.at/index_en.html abgerufen
- Bazjanac, V., & Crawley, D. B. (1997). The implementation of industry foundation classes in simulation tools for the building energy. *Building Simulation* (S. 203-210). Prague, Czech Republic: IBPSA.
- Biljecki, F., Kumar, K., & Nagel, C. (27. August 2018). CityGML Application Domain Extension (ADE): overview of developments. *Open Geospatial Data, Software and Standards volume 3*.
- Braun, R., Weiler, V., Zirak, M., Dobisch, L., Coors, V., & Eicker, U. (2018). Using 3D CityGML Models for Building Simulation Applications at District Level. *International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*. Stuttgart, Germany: IEEE.
- Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG). 2020. *Produkte und Services*. Abgerufen am 14.02.2020 von <https://gdz.bkg.bund.de/>
- Bundesministerium für Digitalisierung. (kein Datum). *Open Data Österreich*. Abgerufen am 11. 02 2020 von <https://www.data.gv.at>
- Bundesamt für Landestopografie (2020). swisstopo online shop. Available at: <https://shop.swisstopo.admin.ch/de/> / (Accessed: 20th February 2020)
- Chen, Y., Hong, T., Luo, X., & Hooper, B. (November 2018). Development of city buildings dataset for urban building energy modeling. *Energy and Buildings 183*, S. 252-265.
- DESTATIS. (2020). Gemeindeverzeichnis-Informationssystem GV-ISys. Abgerufen am 14.02.2020 von <https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Regionales/Gemeindeverzeichnis/Administrativ/Archiv/GV100ADQ/GV100AD2902.html>
- Deutsche Post. (2019). Data Factory. Deutschland. Abgerufen am 06. February 2020 von <https://www.deutschepost.de/de/d/deutsche-post-direkt/datafactory.html#>
- Dong, B., Lam, K., Huang, Y., & Dobbs, G. (2007). A comparative study of the IFC and gbXML informational infrastructures for data exchange in computational design support environments. *IBPSA- International Building Performance Simulation Association*, S. 1530-1537.
- EnDK. (2020). Der GEAK. Available at: <https://www.geak.ch/de/der-geak/>. (Accessed: 20th February 2020)
- European Data Portal. (2019). *European Data Portal*. Abgerufen am 06. February 2020 von <https://www.europeandataportal.eu/en/providing-data/goldbook/open-data-nutshell>
- FSO. (2020). Federal Register of Buildings and Dwellings. Available at: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/en/home/register/federal-register-buildings-dwellings.html>

- (Accessed: 20th February 2020)
- Geiger, A., Benner, J., Häfele, K., & Hagenmeyer, V. (2019). Building Energy Simulations at Urban Scale Based on Standardized Data Models Using a Transparent Enrichment Process. *Building Simulations - International Conference and Exhibition*. Rome: IBPSA.
- Geoland. (2020). *geoland.at*. Accessed on 09. 02 2020 from <https://www.geoland.at>
- Gröger, G., Kolbe, T. H., Nagel, C., & Häfele, K. H. (2012). *OGC City Geography Markup Language (CityGML) En-coding Standard*. Open Geospatial Consortium.
- International Organization for Standardization (2013), ISO/PAS 16739:2005 Industry Foundation Classes, Release 2x, Platform Specification (IFC2x Platform). Central Secretariat, Geneva, Switzerland.
- Malhotra, A., Frisch, J., & van Treeck, C. (2019). Literature review concerning IFC, gbXML and CityGML data models for energy performance simulations. Aachen: RWTH Aachen University.
- Open Government Data (2016), Available at: <https://www.govdata.de/> (Accessed: 25th February 2020)
- Population Division of the UN Department of Economic and Social Affairs (UN DESA) in 2018 Revision of World Urbanization Prospects (2018)
- Reinhart, C. F., & Davila, C. C. (2015, December). Urban Building Energy Modeling – A Review of a Nascent Field. *Building and Environment* 97, pp. 196-202.
- Rosser, J. F., Long, G., Zakhary, S., Boyd, D. S., Mao, Y., & Robinson, D. (29. March 2019). Modelling Urban Housing Stocks for Building Energy Simulation using CityGML EnergyADE. *International Journal of Geo-Information* 2019, 8(4), S. 163.
- Sola, A., Corchero, C., Salom, J., & Sanmarti, M. (23. November 2018). Simulation Tools to Build Urban-Scale Energy Models: A Review. *Energies*.
- Swan, L. G., & Ugursal, V. I. (2009). Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renewable Sustainable Energy*, S. 1819-1835.
- Wetter, M., van Treeck, C., Helsen, L., Maccarini, A., Saelens, D., Robinson, D., & Schweiger, G. (September 2019). IBPSA Project 1: BIM/GIS and Modelica framework for building and community energy system design and operation - ongoing developments, lessons learned and challenges. *Earth and Environmental Science*, Vol. 323, S. 012114.

A DECISION SUPPORT SYSTEM FOR BIM MANAGERS ON THE EXAMPLE OF THERMAL SIMULATION

A. Shadrina¹, A. Gutierrez², A. Sporr¹, B. Blank-Landeshammer¹, S. Fallman³, G. Zucker¹,
C. Ruhsam², A. Ferreiro Sistiaga⁴ and K. Kogler³

¹Austrian Institute of Technology

²ISIS Papyrus Europe AG

³CES clean energy solutions GesmbH

⁴CYPE Software

ABSTRACT

We introduce a project management decision support system using Adaptive Case Management (ACM) and show how the information about the thermal performance of a building is constantly tracked throughout the design process. The targeted key performance indicators (KPIs) are heating and cooling demand as well as summerly overheating. The overall model quality is documented over the number of inconsistencies between the architectural and building physics partial models. The practical use cases demonstrate how the collaboration between two planning teams sharing project models is facilitated to evaluate the energy-related KPIs for a streamlined collaboration to improve the quality of the project.

INTRODUCTION

The rising popularity of BIM methods in the architecture, engineering and construction industry sparked worldwide the development of software tools that support and encourage a transparent collaborative workflow between all involved stakeholders. Cobuilder, BIMCollab, BIMQ, Viewpoint or bim.server.center are the examples of software products used to store and organize the project information. However, there is not yet a platform that supports the planning and execution in a flexible way, i.e. without strict workflows, but also allows true collaboration beyond a simple file manager. We present a solution where the exchange of information and decision making is guided by the project objectives and where the decisions made by each *Actor* during the planning phase can be traced; the necessary support for a compliant workflow is provided by business rules.

This work defines the collaboration workflow as business focused value stream (VS), covering all modelling goals to be reached (e.g. Approve the architectural model) together with the related Tasks (so called “Actions”), information and involved Actors, with roles such as BIM manager, Architect and Building physics engineer, without relying on the predefined processes or workflows which is not sensibly possible due to the nature of evolving collaboration work. Thus, we replace Processes by

goals and a set of available actions, which can be constrained by business rules in order to comply with regulations and laws, until the Actors reach a certain goal by fulfilling completion criteria. This methodological approach is applied to energy-related calculation Tasks of real life building projects using the ACM solution Papyrus Converse, where (1) building Actors store the information (architectural models, thermal properties, etc...) associated with each Task in the project management platform and (2) the objectives are formally defined by business rules so that they can be automatically assessed using the related information. In this way, all involved Actors of the system have the freedom to handle the uniqueness of each situation of a project in order to fulfil the performed actions (provide thermal properties, approve thermal simulation, etc.) in a compliant way. The BIM manager has full traceability of the responsibility of each Actor involved in the collaborative workflow.

STATE OF THE ART

The influence of the collaboration tools and of the communication quality on the building energy efficiency has been profoundly studied (see Haymaker et.al, 2005, Cerovsek T., 2011, El-Diraby T. et al., 2017, Charalambous et.al, 2017, GhaffarianHoseini et al., 2019).

Haymaker et.al in their publication from as early as 2005 compare the theoretical concept of the information exchange with the “chaotic” reality and approach it with the methods developed at the Center for Integrated Facility Engineering (CIFE), Stanford: *POP Method*, *Narratives*, and *the Decision Dashboard*. *POP* stands for Product, Organization and Process, which are also the vertical headers for the POP Model table. On the horizontal scale they place Function, Form and Behaviour. “Energy Analysis” in the intersection of the Behaviour and Product, for example, has “Many Options” in the Organization column and “Minimal latency” in the Process column. *Narratives* method in (Haymaker et.al, 2005) servers as an input into the *Decision Dashboard*, forming a scheme of connected Nodes and their Dependencies. An example of such a Node is “Option A (Atrium)”

originating from the “Design Antrium” Node and connected, among others, to the “First Cost Option A” and “Productivity Option A (Best Case)” Nodes. *Decision Dashboard* is an organizer for the Nodes and Dependancies, allowing the User to navigate between different design options and compare them by such factors as Productivity and Costs. A lot has changed since 2005, and such software solutions as, for example, Cove tool (Cove tool, 2020) can support the decision making process with the machine learning optimization algorithms, but such methods as discussed by Haymaker et.al are still worth revisiting while looking at the communication challenges in the BIM application context.

Oraee et. al (2017) offers a comprehensive review of the collaboration tools and approaches, pointing out that “collaboration has been almost entirely addressed from a technology-oriented lens” while the lack of information management and process misalignments is one of the main obstacles in addressing the challenges outlined above. In the qualitative part of their research, the authors define five key notions – *Context*, *Process*, *Task*, *Team* and *Actor*. In particular, *Context* is understood as organisational environment and BIM education and *Process* as tools and software, while the other notions address the influence of the task types (*Task*), defining roles and responsibilities in the teams (*Team*), and the role of the individual team members (*Actor*). According to their analysis, *Task* and *Actor* are receiving less attention in the collaboration studies in comparison to *Process* and *Context*.

In this study and in an associated research project, we are addressing *Actors* in a *Team* and their *Tasks*. An IFC-based thermal simulation of three projects is used for the configuration of an energy-calculation application built on the Adaptive Case Management (ACM) approach (Swenson, 2010). ACM supports the execution of business cases – the *construction projects* – based on the analysis of the data for each case and on the decisions taken by the *Actors* according to their expertise instead of a predefined strict workflow. The orchestration of a traditional process-based workflow that adapts to the individuality of each building case and involved *Actors* is difficult or even impossible, so that ACM proposes the assessment of the current situation to support the *Actors* in their decisions which next best action is to be performed to reach the specified goal. The information regarding the execution of each *Task* and the taken decisions of each *Actor* is stored in the case and can be fully traced through the project life cycle.

Finally, there is currently no or little support of the IFC data exchange among the tools used in Austria for the calculation of the heating and cooling demand as well as the checking of summerly overheating. On the international scale, there are already some simulation software tools such as CYPEtherm, Eplus or IDA-ICE which are able to exchange data with the help of IFC,

nevertheless the approach of creating Plug-ins to link two particular applications, and even two particular versions of these applications, is still the most prominent solution to this problem. The focus of this work, however, has been placed on the communication between the *Actors* and the distribution of *Tasks*, rather than on the technological challenges and their *Context*.

METHODOLOGY AND APPROACH

Project setup

In terms of thermal simulation, this project focuses on the setup and configuration of the common project collaboration workflow to ensure precise and timely communication between the members of the architecture team and the building physics team. Thus, an attempt is made to study how an improved communication and a clear definition of *Tasks* can ensure that IFC models exported by an architect can be used for thermal simulation rather being forced to recreate a thermal model manually in different tools.

Another goal of this research is the rapid verification of energy efficiency benchmarks as key performance indicators (KPIs) that quantitatively assess the influence of planning decisions on energy efficiency (e. g. thermal losses across the building envelope, expected heating demand or summerly overheating in critical areas), giving direct feedback to the planner or architect on the impact of design decisions.

Figure 1 shows the used modelling software and the associated data formats involved in the thermal KPIs tracking integrated into the ACM platform Papyrus Converse (ISIS Papyrus, 2019). It also presents the formats and tools required to check the completeness of the building material information.

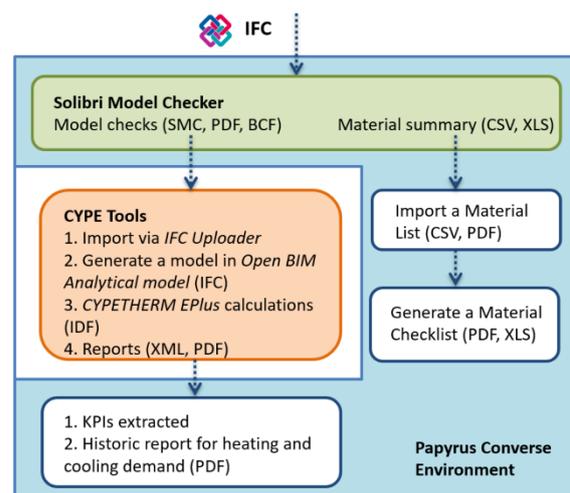


Figure 1 Software setup and data formats

Papyrus Converse (blue background in Figure) offers (i) a Business Designer (Papyrus Converse Composer) which empowers the business analysts with a graphical user interface to build their own conversational business applications as business value

streams. They use domain specific business language defined by an ontology, a rule book for business rule definitions and (ii) a conversational user interface (Papyrus Converse Player) for an easy and intuitive chat-style type of collaboration work available as Web- and Mobile-application.

Integration with existing applications and infrastructure is facilitated by a broad variety of Papyrus Adapters and Type Managers in order to automate actions whenever technically feasible. These compiler and platform independent interfaces reduce the amount of time and effort required for interfacing with existing applications, data and devices. For example, Papyrus Converse manages the execution of the Solibri model checker (shown in green in *Figure*) (Solibri Inc, 2020) and the associated input/output files using its autorun feature. The CYPE Tools were not so tightly integrated because the required interfaces were not in scope of the project.

CYPE Tools (shown in orange in *Figure*) are the thermal simulation tools and the associated model import/editing software programs. Initially the “IFC Builder” was used to create the analytical model for the simulation, however another tool called “OpenBIM Analytical model” in combination with the “IFCUploader” showed better results (see the section “**Use Case 2: Model Import and the analytical model**” for more details).

The output of the **Solibri model checker** is a list of detected issues in three different formats: a PDF report, a BIM Collaboration Format (BCF) report and a native Solibri file.

The material summary is generated with the Solibri user interface from the architectural model and exported as an Excel spreadsheet (see section “**Use Case 1: Basic model checking**”). Then this material summary is compared with the “material list” which is generated with the building physics software. The comparison result is exported into a PDF report (“Material Checklist”) containing a summary pie chart and a table with a combined table from a Material list and a Material summary. The marking indicates which material was found in the architectural and/or building physics list, so that the BIM manager can take decisions based on this report.

At the current stage of research, the material list for the building physics (BPH) model is created manually as materials cannot be exported in this format from the CYPE software. Nevertheless, it was discussed with CYPE to become available in future software releases.

All of these files and their subsequent versions are transparently stored in Papyrus Converse, while editing is done in the native applications.

It is important to note, that the term “Material” in this paper defines “a building element type”, hence the “Material List”, “Material Summary” and “Material Checklist” are different stages of what is often referred to as “Bauteilliste” in the Austrian building physics

practice. For example, a description such as “external wall of reinforced concrete with mineral wool insulation” is referred to as a “material”, while “reinforced concrete” is referred to as a “material layer”.

Use Cases

The goals of the thermal simulation value streams are defined based on the following four use cases (*Table 1*): (i) *Basic model checking*, (ii) *Definition of thermal properties of building envelope*, (iii) *Simulation of Heating and Cooling demand* and (iv) *Simulation of Summerly overheating*. Different KPIs are defined for each use case in order to measure the project progress.

Table 1: KPIs of the use cases

Use Case	Use case name	KPI in the project
UC1	Basic model checking	<ul style="list-style-type: none"> nr. of gaps between the building elements nr. of overlaps in building envelope nr. of correctly assigned material names
UC2	Thermal properties of building envelope	<ul style="list-style-type: none"> U-Values of the envelope [W/m²K] g-Values of the envelope
UC3	Heating and cooling demand	<ul style="list-style-type: none"> total heating demand [kWh/m²a] total cooling demand [kWh/m²a]
UC4	Summerly overheating	<ul style="list-style-type: none"> cooling demand in critical zones [kWh/m²a] operative room temperature in critical zones [°C]

The UC1 includes reviewing the building model created by the architect (ARCH Model) to ensure the building envelope is closed and material names for the building elements are assigned. The definition of thermal properties (UC2) is performed after the assignment of materials to building elements, which allows calculating U-values and g-values for the transparent building elements. These two values are the KPIs for this use case. Finally, based on the thermal properties and further settings (see section “IFC-based thermal simulation”), thermal simulation applications evaluate either *the heating and cooling demand* or *the summerly overheating*, which are the KPIs for the corresponding use case (UC3 and UC4, respectively). This set of properties is covered by the building physics model.

PLATFORM IMPLEMENTATION

Value stream definition

Papyrus Converse implements the ACM methodology described in (Gutierrez Fernandez, et al., 2019a) and (Gutierrez Fernandez, et al., 2019b), where each case is described as a value stream (VS). VSs are defined as an end-to-end value for the building project owner,

i.e. each single value stream is expected to provide a benefit for the involved partners when successfully finished. The value streams for the four use cases are illustrated by a Figure 2: (i) *Approve ARCH model* (UC1) after basic model checking, (ii) *Approve BPH model* (UC2) after providing thermal properties, (iii) *Approve Cooling and Heating demand* (UC3) and (iv) *Approve Summerly Overheating* (UC4), respectively. A value stream is formally defined by a sequence of goals which the *Actors* have to fulfil through the execution of actions like uploading the building model. The fulfilment of the goals is assessed by the Papyrus Converse platform through permanent observation of goal completion actions which represent formally defined completion criterions like “ARCH model must be approved”. As long as they are not fulfilled, they are clearly marked to the *Actors* as open actions.

Figure 3 shows the last three VSs (UC2, UC3, UC4) in detail. Actions marked with grey colour are to be manually executed by Actors, in order to provide the data needed for the execution of the next action. Those actions marked with a rhombus symbol require the fulfilment of an explicit business rule in order to progress with the value stream.

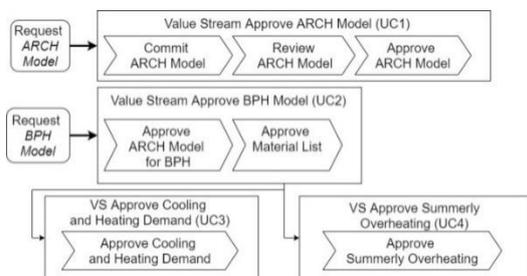


Figure 2.: Value streams for the thermal calculation collaboration workflow

With the two action integration possibilities, namely (i) direct invocation of external programs from Papyrus Converse or (ii) loose integration where Actors are only instructed to deliver certain values for the execution of a certain action, we could prove the flexibility of the solution. This is especially important for a tool-agnostic approach in order to avoid dependencies from tools and which integration interfaces they offer. Thus, constructing collaboration workflows as depicted in the Figure 2 and Figure 3 supports the BIM Manager and the contractors to comply with the project-related Employer Information Requirement (EIR) document (BS EN ISO 19650-5:2020).

Ontology definition

Business goals and rules are described using business concepts, e.g. “building envelope”. These business concepts are described in a domain-specific business ontology in order to ensure uniqueness of terms and their alignment between all involved parties.

An ontology is a formal description of knowledge as a set of concepts within a domain (e. g. architectural

model, building materials), their specific properties (e. g. creation date, model file, model author) and the relationships that hold between concepts (e. g. a building envelope has materials). The formalization of such business concepts in an ontology is also a first step to automate their management (persist building data, evaluate the business rules, etc.).

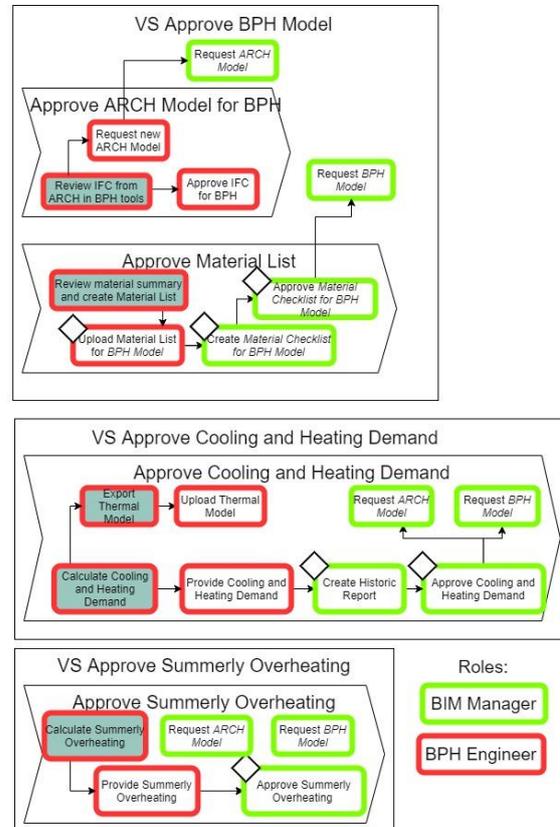


Figure 3: A detailed view of the value streams for the use cases 2-4

The novelty of the taken approach with Papyrus Converse is that value streams with their business goals and rules can be defined and managed by business analysts and do not require IT-development. This way VSs can be amended in short iterations, which is important in order to react short term to changing business requirements and laws. Rules are defined with a formalized natural language editor. This allows to define business logic like: “In order to calculate *Heating Demand*, the *BPH Model* must have a *Material List Report*”, which uses the involved specific business concepts (e.g.: *BPH Model*, *Material List Report*, *Heating Demand*) to assess, if the heating demand can be calculated.

The formalization facilitates a structured approach supported by modelling tools to ease the definitions. Figure 4 shows an excerpt of the domain specific ontology focusing on the *BPH model*, its properties (*Material List Report*, *Material Checklist Report*, *Cooling Demand KPI*, etc.) and that it *extends* the *arch model*.

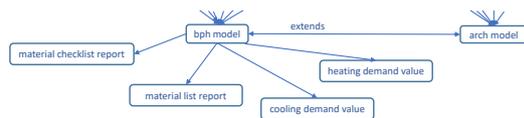


Figure 4: Ontology graphical editor

Rule-based collaboration workflow

Based on the relations between business concepts and their properties, the business analyst can define business rules with natural language patterns. For example, as stated before, the building physics model with U-values and g-values is defined through the related architectural model (walls, window and door openings, etc.). A typical relation is “A *BPH Model* extends the *ARCH model*”.

The rules can be used (i) as goal completion criteria for a certain value stream instance or (ii) as constraints for actions, e.g. “To calculate the heating demand, the building physics model must have a material list report”. The defined rules and the evaluation of their status (*satisfied* and *unsatisfied*) support the *Actors* in the execution of a VS instance either as a recommendation of a best next action or to prevent the execution of certain actions which are not yet eligible.

IFC-BASED THERMAL SIMULATION

Test cases and associated files

Three test cases were provided by the participating construction and engineering companies as IFC files: a fragment from a multi-storey residential building, or “tower” (ten floors from the original project), a hotel building and an office building (Figure 5).

As a coincidence, all three of them were modelled in Autodesk Revit, but originate from different architectural companies. However, none of them directly participated in the research project, so the possibilities to adapt these models were limited (the models were only available in IFC, not in the native authoring format). Nevertheless, the value streams were configured to allow the tracking of iterative collaboration and to ensure the support for the improvement of the models based on the requirements by the BIM manager and building physics engineer. We explicitly wanted the thermal calculation being done on the original architectural model rather than on a geometry recreated with a special building physics tool only for the purpose of thermal simulation.

However, further models were still necessary in order to test the workflows and to detect the steps where the data loss occurs: a simplified box model with four walls, windows and doors and a simplified tower model created in the IFCBuilder. In the following section the model-checking approach is described.

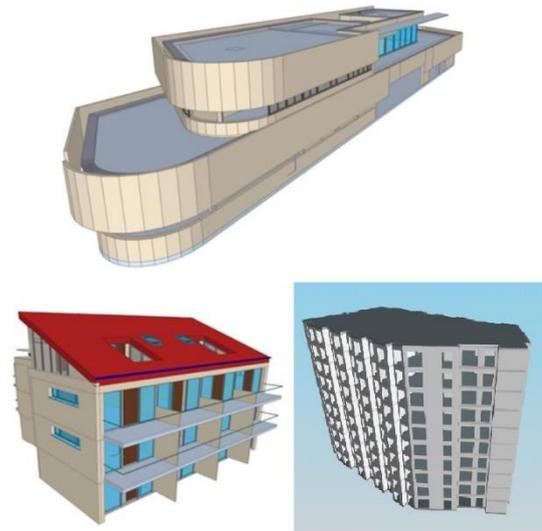


Figure 5: 3D views of the test cases: office (top), hotel (bottom left), residential tower (bottom right)

Use Case 1: Basic model checking

The Solibri Model Checker is used to check the model quality of the IFC models. Predefined model-checking rules in the Solibri environment can be used or combined through configuration. Furthermore, checking rules can be freely defined through the API (Application Programming Interface) offered by Solibri. In the first step predefined rules are combined in a way to identify three different errors, which are relevant for heat demand calculations:

Gaps between outer walls: Gaps between outer walls can be identified by using different methods and identifiers: first, only walls, which have “is external” property set to “true”, are included into the checking process. These walls are checked depending on their base areas distance and the relations stored in IFC to each other. Distances that exceed the predefined value or missing links are resulting in an error.

Overlaps of different IFC entities: Overlaps of different IFC entities are checked depending on their base ground again. If there is any intersection, an error is generated.

Existence of material names: The existence of material names is checked by investigating the material, which is referred from Solibri to particular elements.

All errors are accumulated into a report, which can be exported in different formats as BCF (BIM Collaboration Format) or PDF (Portable Document Format). The results of the above-mentioned checks depend on the model quality: if IFC properties like “is external”, or different relations are not assigned, the checks will fail, and the result will not be meaningful. In this case, the change request is sent to the Architect with the indication on what should be changed in the BCF format (see Figure 2 the topmost green rectangle “Request ARCH model”).

In a second step, a Java program exports a list of materials from the IFC file (see Table 2) using the API offered by Solibri. This program is executed in Solibri like a regular Solibri rule and creates an Excel-file with two sheets of data. In the first sheet a list of all checked components with their identifier, name, respective material definitions, as well as their gross area is listed. The second sheet contains a list of all the different materials used in the components of the IFC model that were part of the checking, as well as the overall gross area of components each of those materials is assigned to. As shown in Table 2, only slabs, walls and roofs were considered so far.

Use Case 2: Model Import and the analytical model

As the models provided by the participating companies were not created and exported according to the standards required for the seamless import into IFC Builder, many initial attempts of importing the IFC models into the IFC Builder resulted in most of the model components missing. But attempts for a holistic modelling approach using the default Revit family, provided by Autodesk, for a simplified “box building”, containing only four walls, two slabs, doors and windows, has proven a successful import into IFC Builder. Similar issues are documented for other IFC-based simulation software (see Chen.Q et al., 2017).

Table 2: Material summary structure

Property in the output file	Source in the IFC
GUID	GUID
IFC Type	IfcElement type: IfcWall, IfcSlab or IfcRoof
Name	Name of the IfcElement
Gross Area (m2)	Solibri calculation based on geometry
Material name	Name of the IfcMaterial
Material thickness (cm)	Thickness of the IfcMaterialLayer containing the IfcMaterial

Further attempts were made to import the IFC model using the new “Open BIM Analytical Model” tool (CYPE Software, 2020). This tool is currently in a prototype stage, however, the import of the already mentioned simplified box building as well of the simplified Tower model clearly shows the advantages over the IFC Builder. The rooms (IfcSpaces) are also correctly imported and do not have to be manually redefined, which results in considerable time savings compared to the IFC Builder approach.

As a result of the data exchange using IFC, it can be summarized that simulation programs for determining heating and cooling demand as well as checking the summerly overheating require a very simple or, in other words, generic model to avoid the manual trimming and tuning work within the BIM software tools. In reality, however, architectural models are often very complex and contain many components that are irrelevant for the simulation, such as handrails,

equipment elements, facade details, etc. One of the solutions could be standardized export settings utilizing Level of Detail specifications (LODs) and relevant Model view definitions (MVDs), so that only components necessary for the simulation are part of the export. This would benefit if the import into the simulation software would be standardized as well.

Use Cases 3 and 4: Model Setup and simulation

Once the analytical model has been successfully created, the calculation was done in CYPETherm EPlus, using the necessary target values for heating and cooling temperatures and room occupancy, as well as inputs for shading, internal thermal loads, orientation and location including current weather data sets. Unfortunately, the “Open BIM Analytical model” tool does not recognize neither the materials nor the material layers which are indispensable for the simulation. We solved that with a manual creation of the material layers and therein contained materials in a list in PDF-format. Once all the setup has been completed, the operative room temperature can be simulated as well as the heating and cooling demand.

Simulation results can be exported in a variety of formats, including text formats, a PDF as well as an IDF- and an XML-format. An XML has the advantage of an automatic KPI-extraction from the simulation report in order to document it in the Papyrus Converse project platform.

It should be noted that CYPETherm EPlus can be used for building load calculations and sizing equipment, which uses the heat balance method recommended in the ASHRAE handbook fundamentals (ASHRAE, 2017), but does not support the exact procedure for the summerly overheating calculation required in Austria (OIB, 2015). Nevertheless, as the focus of this study was not to produce a set of documents for an official project submission, it was decided that a maximum operational room temperature in summer serves as measure for summerly overheating in both residential and non-residential test cases.

The results of each thermal simulation run for a specific version of the building model are historically stored in Papyrus Converse as part of the value streams. Evaluated against the specified KPIs, these results show the impact of model changes for each model iteration, as it is depicted in the Figure 6.

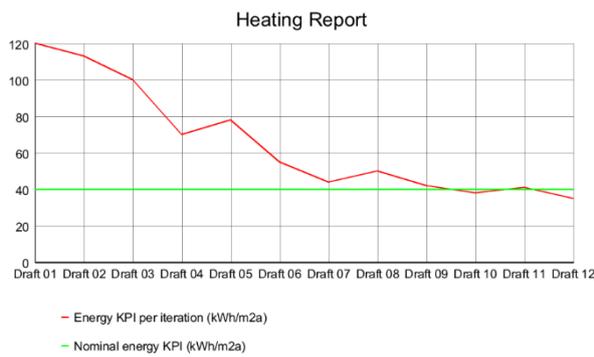


Figure 6: Audit report of the improvements in the heating demand KPI

Analysis and discussion

The assessment of the energy indicators continuously present during the execution of the collaborative workflow for the described use cases in order to guide the *Actors* when performing their work. Some of these indicators are calculated with the help of third party tools, such as Solibri Model checker, IFC Builder, Open Analytics Tool, or CYPETherm Eplus. The use of these indicators in each use case is as follows:

- UC1: The assessment of the quality of the building envelope is supported by the integration with Solibri model checker based on the predefined model checking rules, which are executed as soon as the architectural model is committed.
- UC2: Automated comparison between material lists: one list was generated from the architectural IFC and one based on the building physics model. The goal of such a comparison is a unified list of materials used by the project consortium from the beginning. Furthermore, an overview of all materials in the IFC model and their areas is automatically generated with the help of Solibri.
- UC3, UC4: The KPIs from the XML reports exported from the thermal calculation tools are uploaded into the project platform Papyrus Converse.

The execution of the use cases showed the following obstacles handicapping a fully automated integration with external tools:

UC1: There is a large discrepancy between the modelling conventions for architectural models and the requirements for the seamless import into the IFC Builder or into the Open BIM Analytical Model tool: export to IFC is a fragile process that depends on various export parameters that are proprietary to the authoring tool. Further standardization with regard to a consistent Employer's Information Requirements (EIR) is needed.

Furthermore, the resulting BCFs exported from the model checks need to be manually processed by the BIM manager before they can be used as a basis for the basic model quality assessment and for thermal simulation.

UC2-4: The approach to the automation of these use cases would be to store the materials and the settings for the simulations (such as occupancy schedules, location, target operative temperatures, etc.) separately from the geometry. All of these settings should be combined and described as a building physics partial model prepared by the building physics engineer. After the architectural model is approved, it would be automatically merged with the building physics model and the result could be exported as a consolidated IFC file.

However, that approach turned out to be hard to implement not only in the CYPE tools, but also by the majority of the thermal simulation applications which was confirmed by our industry project partners who are actively using such tools. Not only that the simulation tools do not generally offer a possibility to export a building physics partial model as an IFC or any other machine-readable format, but the idea of exporting and sharing the company's know-how with the planning team may raise questions about liabilities.

Further discussions and experiments are needed to clarify possible alternative approaches to the automated IFC-based thermal simulation.

CONCLUSION

Assessing the energy performance of buildings in terms of their heating and cooling demand within the open BIM practice in Austria often involves remodelling the building envelope using a thermal simulation software, although the envelope was already modelled by an architect in a BIM authoring tool. The presented study and an associated research project contribute to the ongoing efforts of extending the application of an IFC-based automatic thermal simulation in the Austrian construction industry by analysing the business processes leading to the thermal simulation and assessing the requirements to the model without the remodelling effort.

The application of the ACM principle by using Papyrus Converse for the presented energy calculation value stream offer valuable insights into how a rule-based collaboration and adaptation of the employer's information requirements for an individual project can foster clear communication between such *Actors* as BIM manager, Architect and Building physics engineer. Such improved communication will then lead to the improvement of the energy efficiency of the building due to the better-informed decisions from all the *Actors* involved.

Papyrus Converse provides functionality beyond the conventional BIM repository, where the underlying processes can be defined by business analysts using domain specific ontology definitions and formalized natural language for business rule definitions in order to guide and document the communication process between different teams. The integration of all

involved tools can be flexibly handled by the Papyrus Converse platform but depending on the used tools may require manual steps.

The potential use of such a flexible collaboration workflow extends far beyond the thermal simulation. For example, standardized processes for the information exchange in the architecture and construction industry, such as ON A 6241 in Austria and ISO 19650 can be easily implemented by Papyrus Converse as another value stream template together with the associated model checks.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work is funded by the Austrian Research Promotion Agency (FFG) within project BIMSavesEnergy (grant agreement number 861710).

REFERENCES

ASHRAE, 2017, Chapter 19 “Chapter 19, Energy Estimating and Modeling Methods”, American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. accessed on 9.04.2020. URL <https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook/description-2017-ashrae-handbook-fundamentals>

BS EN ISO 19650-5:2020 “Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM). Information management using building information modelling. Security-minded approach to information management”

Cerovsek T., 2011 “A review and outlook for a ‘Building Information Model’ (BIM): A multi-standpoint framework for technological development”, *Advanced Engineering Informatics* Volume 25, Issue 2, April 2011, Pages 224-24

Charalambous G., Demian P., Yeomans S., Thorpe T., 2017 “Impact of collaboration tools and shaping the future of data exchange – A model for BIM communication waste” Chapter 10 of “Advances in Construction ICT and E-Business”, edited by S.Perera, B.Ingirige, K.Ruikar and E.Obonyo, Routledge, London 2017

Chen Q., Harmanci Y.E., Ou Y., de Soto B. G, 2017 “Robust IFC files to improve information exchange: an application for thermal energy simulation” the Proceedings of SEC 2017 - 9th International Structural Engineering and Construction Conference.

Cove Tool, 2020 accessed on 6.07.2020. URL <https://www.cove.tools/>

CYPE Software, Open BIM Analytical Model application, accessed on 10.04.2020. URL <http://open-bim-analytical-model.en.cype.com/>

El-Diraby T., Krijnen T., Papagelis M., 2017. „BIM-based collaborative design and socio-technical analytics of green buildings” *Automation in*

Construction Volume 82, October 2017, Pages 59-74

Gutiérrez Fernández, A. M., Van Rijswijk F., Ruhsam C., Krofak I., Kogler K., Shadrina A., Zucker G. 2019. "Applying adaptive case management to enable energy efficiency performance." Proceedings of the Industry Forum at {BPM} 2019 co-located with 17th International Conference on Business Process Management (BPM) 2019). Vienna: CEUR-WS.org. 142--153.

Gutiérrez Fernández, A. M., Van Rijswijk F., Ruhsam C., Krofak I., Kogler K., Shadrina A., Zucker G.. 2019. "Applying Business Architecture Principles with Domain-Specific Ontology for ACM modelling: A Building Construction Project Example." *Business Process Management Workshops - {BPM} 2019 International Workshops*., Vienna: Springer.

ISIS Papyrus, 2019. "Papyrus Converse." <https://www.isis-papyrus.com/e15/pages/business-apps/papyrus-converse.html>.

GhaffarianHoseini A., Zhang T., Naismith N., GhaffarianHoseini Am., Doan D.T., Rehman A.U., Nwadigo O., Tookey J. 2019 “ND BIM-integrated knowledge-based building management: Inspecting post-construction energy efficiency” *Automation in Construction* Volume 97, January 2019, Pages 13-28

Haymaker J., Kam C., Fischer M., 2005 “A methodology to plan, communicate and control multidisciplinary design processes” CIFE, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, CA, USA

OIB, Austrian Institute of construction engineering, 2015, Richtlinie 6 “Energieeinsparung und Wärmeschutz“, accessed on 9.04.2020 URL https://www.oib.or.at/sites/default/files/richtlinie_6_26.03.15.pdf

Oraee M., Hosseini M.R., Papadonikolaki E., Palliyaguru R., Arashpour M., 2017 “Collaboration in BIM-based construction networks: A bibliometric-qualitative literature review”, *International Journal of Project Management* Volume 35, Issue 7, Pages 1288-1301

Solibri Inc., 2020. Solibri Model Checker software accessed on 6.07.2020. URL <https://www.solibri.com/>

Swenson, K.D. 2010. *Mastering the unpredictable: how adaptive case management will revolutionize the way that knowledge workers get things done.* Tampa: Meghan-Kiffer Pres

XIV: BIM basierte Planungswerkzeuge und Integrationsansätze

DIGITALE PLANUNG UND BIM IM BRANDSCHUTZ - MEHRWERT UND AKTUELLE HERAUSFORDERUNGEN

V. Langner¹ und M. Siemon²

¹Gruner GmbH Wien, Wien, Österreich

²Gruner AG, Basel, Schweiz

KURZFASSUNG

Dieser Beitrag befasst sich mit brandschutzrelevanten Abläufen einer BIM-basierten Planung und gibt anhand von konkreten Projektbeispielen einen Einblick in den aktuellen Stand der Anwendungspraxis.

Konkret werden die Anwendungsmöglichkeiten der BIM-basierten Planung aus Sicht eines Brandschützers dargestellt. Für ein besseres Verständnis werden die Projekte sowie der Planungsablauf zuerst kurz erläutert. Daraufhin wird der BIM-spezifische Beitrag in der Brandschutzplanung beschrieben. Hier wird sowohl auf typische alltägliche Fragestellungen des Brandschutzes als auch auf komplexe Simulationsmethoden eingegangen.

Am Ende des Beitrags erfolgt ein Ausblick in die Zukunft, wie aus Sicht des Brandschutzplaners die weitere Entwicklung bis hin zur modellbasierten Qualitätssicherung auf der Baustelle aussehen könnte.

ABSTRACT

This article deals with fire protection relevant processes of a BIM-based planning and gives an insight into the current state of application practice based on actual project examples.

In detail, the application of BIM-based planning is given from the perspective of a fire protection engineer. For a better understanding, the projects and the planning process are first briefly explained. The BIM-specific contribution in fire protection planning is then described. Here, typical everyday questions of fire protection as well as complex simulation methods are dealt with.

At the end of the article there is a forecasting outlook into the future, from the fire protection planner's point of view, the further development up to model-based quality assurance on the construction site could look like.

AUSGANGSLAGE

In den letzten Jahren ist auch die Bauwirtschaft verstärkt von der digitalen Planung durchdrungen worden. Besonders die mit dem Begriff Building

Information Modeling (BIM) zusammengefassten Methoden gewinnen zunehmend an Bedeutung und werden mittlerweile in konkreten Projekten angewandt. Auch die Brandschutzplanung erfährt durch die Nutzung von BIM konkrete Vorteile für den Bauherrn.

Im Gegensatz zur herkömmlichen Planung wird bei der Planung mit BIM ein digitales Abbild des geplanten oder bestehenden Gebäudes erstellt. Alle Bauwerksinformationen sind hierbei in einer referenzierten Datenbank enthalten, wodurch sich in allen Projektphasen ganz neue Möglichkeiten für Optimierungen ergeben. Diese betreffen sowohl die alltäglichen Herausforderungen des Brandschutzes als auch die Verknüpfung mit komplexen Simulationsmethoden wie Brand- oder Evakuierungsberechnungen.

Dabei werden immer anspruchsvollere Simulationsmethoden herangezogen, um den Bedürfnissen einer offenen und modernen Architektur, auch in der Brandschutzplanung gerecht zu werden. Bei der Brandschutzplanung mit Hilfe von sogenannten Ingenieurmethoden (z.B. Brand- oder Evakuierungssimulationen) ist es möglich, die Einhaltung der Schutzziele des Brandschutzes bei grossvolumigen und komplexen Brandabschnitten oder besonderen Fluchtwegsituationen nachzuweisen. Auch bei Bestandsgebäuden sind bei Abweichungen, nicht selten erst auf Basis moderner Simulationsmethoden, verhältnismässige Lösungen möglich.

Das einbeziehen von BIM führt dazu, dass der Modellierungsaufwand und damit die Kosten für die numerischen Simulationsmodelle (sowohl Brandsimulation als auch Heissbemessung) sinken. Die weit über die dreidimensionale Planung und Kollisionsprüfung hinausgehenden Möglichkeiten von BIM, wie die umfangreiche Definition von Klassen und Attributen, bietet auch für die Ingenieurmethoden im Brandschutz ein hohes Potential an Steigerung von Qualität und Effizienz. Die dafür notwendigen Schnittstellen zwischen der jeweiligen Software sind allerdings noch nicht immer vorhanden.

Die bisher konventionelle Planung basiert im Wesentlichen auf 2D-Plänen mit abstrakten

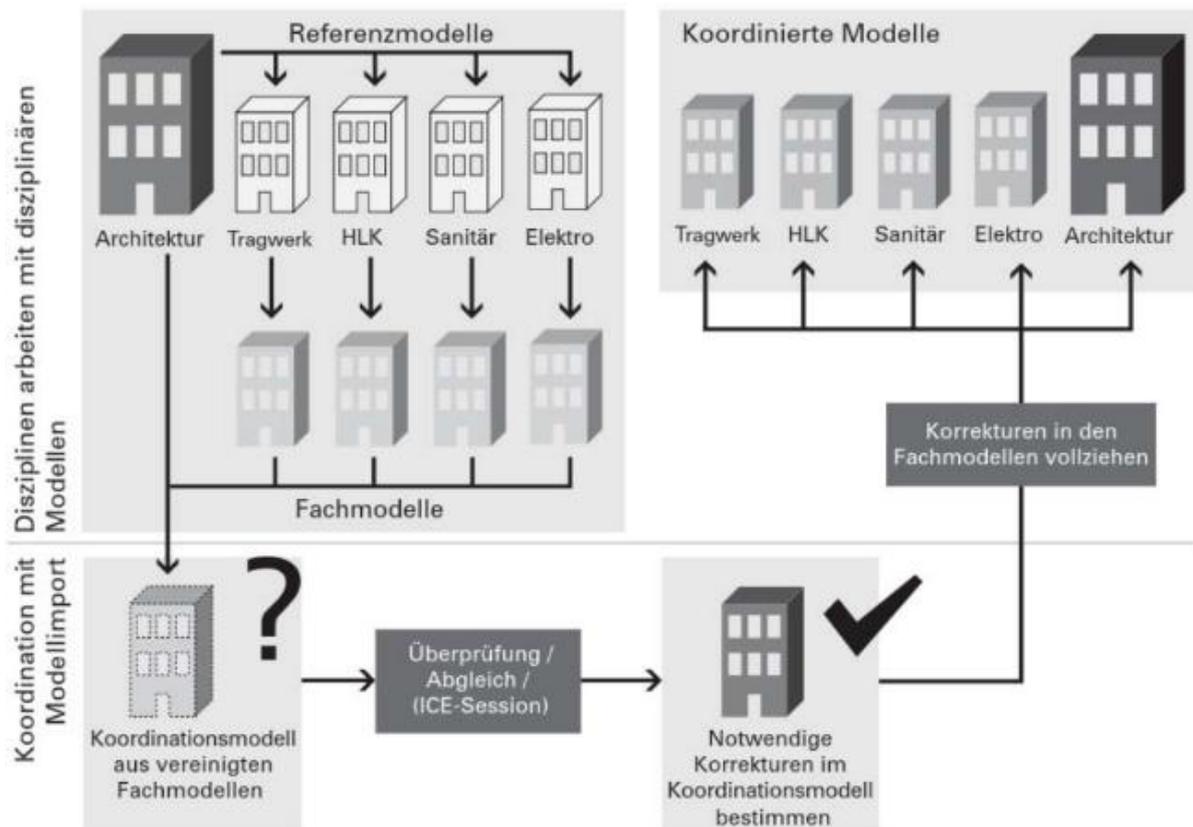


Abbildung 1: Verfahren der BIM-Modellkoordination beispielhaft anhand des Hochbaus (SIA 2051, 2017: S.28).

Elementen (z. B. farbigen Linien, welche die verschiedenen Feuerwiderstandsklassen repräsentieren).

Diese Planungsart bietet nur sehr begrenzte Möglichkeiten einer maschinellen Auswertung wie z. B. eine regelbasierte Prüfung, automatisierte Bauteilliste etc.

Bei BIM-basierter Planung wird ein digitales Abbild des Gebäudes geschaffen, in dem neben einer rein geometrischen 3D-Darstellung auch Informationen hinterlegt sind. So können beispielsweise erforderliche Feuerwiderstandsklassen als Attribut direkt den relevanten Bauteilen zugewiesen werden.

Durch die Verknüpfung der 3D-Darstellung mit einer Informationsdatenbank wird eine maschinelle Verwertbarkeit des Modells ermöglicht, sodass u.a. regelbasierte Prüfungen (z. B. Kollisionsprüfungen der einzelnen Fachplanungen) durchgeführt werden können.

BIM-basierte Planung kann somit eine konsistente Planung aller Beteiligten fördern und trägt dazu bei, dass Planungsfehler frühzeitig erkannt und behoben werden können (Leibich et al., 2001).

FACHPLANERMODELLE UND WORKFLOW

BIM-Planungsprozess

Ziel der Anwendung von BIM-Methoden im Planungsprozess von Hochbauprojekten ist die Förderung einer konsistenten Planung zwischen den jeweiligen Fachdisziplinen. Dies soll durch eine objektorientierte Arbeitsweise gewährleistet werden. So kann eine einfache Tür im BIM-Modell eine Vielzahl an Attributen und Eigenschaften besitzen, welche phasengerecht von den jeweiligen Planern erarbeitet werden.

Die konkrete Abbildung der Eigenschaften ist in der Praxis komplex und erfordert einen hohen Grad an Modellkoordination. So können geometrische Informationen direkt im Modell enthalten sein (z. B. die Abmessungen einer Tür, andere wiederum als Objektattribut beschrieben werden (Dicke einer Brandschutzbekleidung). Zusätzlich haben die Fachdisziplinen unterschiedliche Anforderungen an ihre Modelle.

Aus diesem Grund entscheiden eine zielgerichtete Modellkoordination und Organisation des Planungsprozesses darüber, ob die Vorteile einer BIM-Planung auch aktiviert werden können.

In Abbildung 1 ist der Planungsprozess mit Hilfe von Referenz- und Fachmodellen beispielhaft dargestellt (SIA 2051, 2017: S.28).

Brandschutzplanung

Die Brandschutzplanung unterscheidet sich von anderen Planungsdisziplinen wie z. B. der Tragwerksplanung oder der Planung der technischen Gebäudeausrüstung in der Abgeschlossenheit der eigenen Planungsleistung. Während einige Planungsdisziplinen eine abgeschlossene Planungsleistung mit Klärung der Schnittstellen zu anderen Planungsdisziplinen zum Ziel haben, liefert die Brandschutzplanung in der Regel die objektspezifischen Anforderungen und Auslegungsstandards, die durch andere Planungsdisziplinen umzusetzen sind. So wird die Anforderung nach einer feuerbeständigen Trennwand im Architekturmodell als Brandschutzqualität definiert und ist vom Tragwerksplaner in der Ausführungsplanung zu berücksichtigen. Die Anforderung an eine Brandmeldeanlage, z. B. an die Brandmeldezentrale oder den Funktionserhalt der Leitungsführung, findet die Umsetzung im Modell für die technische Gebäudeausrüstung.

Zentraler Bestandteil der Brandschutzplanung und wichtige Bauvorlage im Genehmigungsprozess ist das Brandschutzkonzept. Darin sind die ermittelten einschlägigen Rechtsgrundlagen und die wesentlichen baurechtlichen Anforderungen der brandschutztechnischen Planung ebenso enthalten

wie die planerischen Zielvorstellungen und eventuell beanspruchte Abweichungen von baurechtlichen Vorschriften.

Die objektspezifischen Brandschutzanforderungen werden entsprechend dem Planfortschritt mehr und mehr konkretisiert. Abweichungen von baurechtlichen Vorgaben und ggf. die Forderung einer anlagentechnische Einrichtungen (z. B. Brandmeldeanlagen) als Kompensationsmaßnahme werden dargestellt und begründet.

Grundlagen zur Organisation von BIM-Projekten für Brandschutzleistungen und die Integration der Brandschutzplanung in ein BIM-Projekt werden unter anderem vom «Verein zur Förderung von Ingenieurmethoden im Brandschutz» (VIB) in einem Arbeitskreis erarbeitet.

Die Planungstiefe (LOD, *Level of Design*) in Abhängigkeit des Planungsfortschritts ist in Abbildung 2 für die Leistungsphasen der deutschen HOAI bzw. dem AHO Heft Nr. 17 dargestellt, welches die besondere Leistung der Brandschutzplanung als Empfehlung regelt.

Workflow

Die Visualisierung des Brandschutzkonzeptes mit Hilfe von Brandschutzplänen erfolgt ergänzend zum textlichen Teil und stellt die baulichen und anlagentechnischen Maßnahmen planerisch dar.



Abbildung 2: Detaillierungsgrad der Brandschutz-Informationen des BIM-Modells in Abhängigkeit der Leistungsphase (Plum und Teske, 2020).

Während die Visualisierung des Brandschutzkonzeptes über BIM abgebildet werden kann, ist das Brandschutzkonzept auch weiterhin unabhängig vom Gebäudemodell als Bauvorlage zu erstellen.

Digitales Projekt

Als Grundlage für die Brandschutzplanung mit BIM dient das *Digitale Projekt*, welches als «Gesamtmodell» die Fachmodelle der jeweiligen Fachplaner vereint. Das Digitale Modell wird vom BIM-Gesamtkoordinator, oftmals der Architekt, verwaltet. Es wird zu Beginn der Planung im nativen Format (z. B. .rvt bei Revit) oder im IFC-Format an die Fachplaner übergeben, für die das Digitale Projekt die Grundlage für das jeweilige Fachmodell darstellt.

Brandschutzmodell

Das übergebene digitale Projekt wird kopiert und durch den Brandschutzplaner weiterbearbeitet. Dieser vergibt die projektspezifisch abgestimmten Attribute und erstellt Issues für den Fall, dass Planungsänderungen (z. B. zusätzliche Türen) erforderlich sind. Der Brandschutzplaner nimmt selber keine Änderungen am Gebäudemodell vor, er vergibt ausschließlich Informationen.

Die zu vergebenden Attribute müssen mit den anderen Fachplanern abgestimmt sein bzw. vom BIM-Koordinator vorgegeben werden. Hier ist es sinnvoll, z. B. mit Hilfe von Auftragnehmer-Informationsanforderungen, Anforderungen an Attribute, Detaillierungsgrad und Format der auszutauschenden Dateien zu regeln (siehe z. B. [VIB, 2020] für die BIM Muster – AIA des VIB).

Weitergehend erstellt der Brandschutzplaner Farbfilter und fügt eigene Familien (z. B. Rettungswegpfeile) in das Modell ein, um am Ende Brandschutzpläne sowie ggf. weitere erforderlichen Pläne aus dem BIM-Modell zu generieren.

Das Modell mit den Farbfiltern und den eigenen Familien stellt das «Anforderungsmodell Brandschutz» dar, wohingegen das ausschließlich um Parameter angereicherter Architekturmodell als «Basismodell Brandschutz» bezeichnet wird.

Modellaustausch

Die Modellsynchronisation der Fachmodelle mit dem digitalen Projekt erfolgt in regelmäßigen Zyklen. Im Vorfeld der Planung sind diese Zyklen klar zu definieren.

Dabei übergibt der Brandschutzplaner dem BIM-Gesamtkoordinator das aktuelle Brandschutzmodell (Anforderungs- oder Basismodell Brandschutz). Weitergehend besteht die Möglichkeit die Brandschutzparameter als Textdatei mit Bezug auf die Bauteil-ID, ohne komplettes Gebäudemodell, zu übergeben. Der Gesamtkoordinator kann bei Bedarf die vom Brandschutzplaner definierten Brandschutzparameter in ihr Modell überführen.

Ebenso übergibt der BIM-Gesamtkoordinator dem Brandschutzplaner bei der Modellsynchronisation das aktuelle digitale Projekt, welches wiederum die aktuellen Informationen der anderen Fachplanermodelle enthält. Der Brandschutzplaner überträgt seine bisherigen Parameter, Farbfilter und Familien in das aktuelle digitale Projekt und plant mit diesem weiter. Um diesen Workflow zu optimieren sollten Elemente

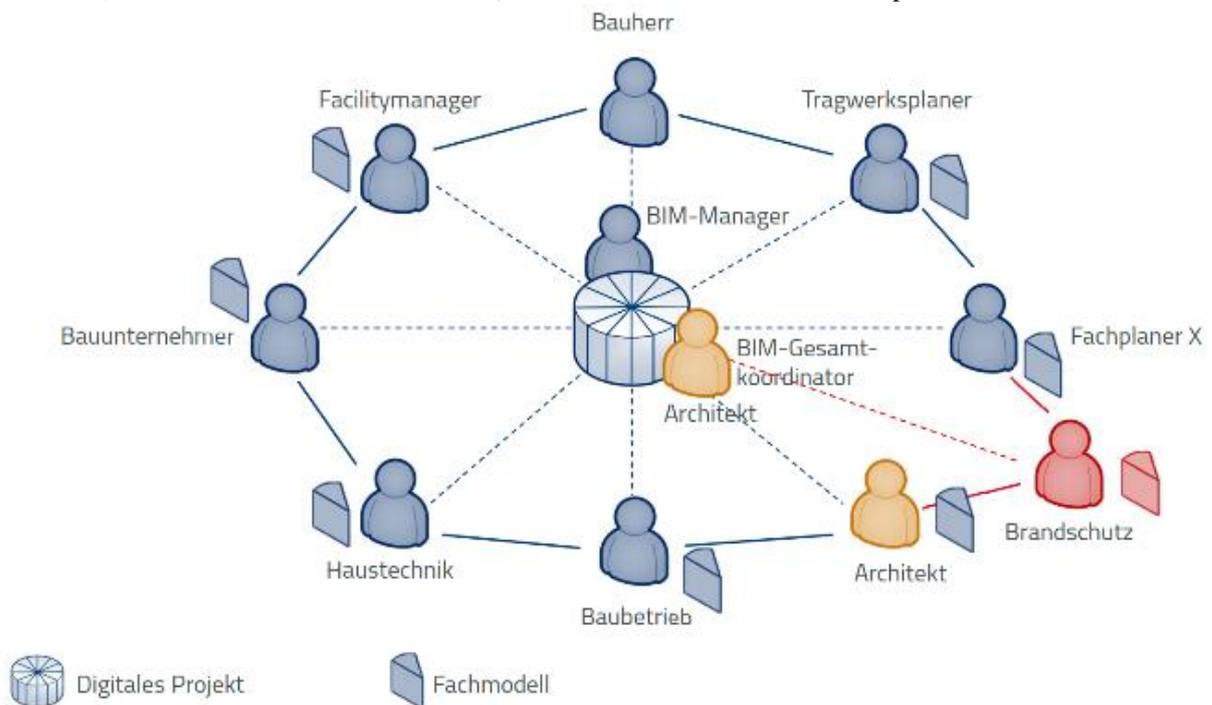


Abbildung 3: Workflow BIM Planung (Plum und Teske, 2020).

seitens der Architektur möglichst nicht gelöscht und neu erstellt, sondern ausschließlich verändert werden, da die automatisierte Übertragung der Brandschutzparameter anhand der GUID / UUID erfolgt.

Im Vorfeld der Planung ist zu definieren, welche Informationen wie, wann und durch wen in das BIM-Modell integriert werden.

Zur Unterstützung der schnellen Abstimmung interdisziplinärer Inhalte findet das BIM Collaboration Format - kurz BCF - Anwendung. Es ist plattformunabhängig und unterstützt damit den BIG Open BIM Gedanken.

Die Koordination während des Planungsprozesses sollte auf Grundlage des BIM-Modells durchgeführt werden. Hierfür sollte eine Koordination über BCF eingesetzt werden, sodass Issues erstellt und den relevanten Personen zugewiesen werden können und eine Dokumentation des Austausches und der Koordination auf einem zentralen Server erfolgt.

Der beschriebene Workflow ist in Abbildung 3 grafisch dargestellt.

Genehmigungsprozess

Nach Abschluss der Genehmigungsplanung (LP 4 in Deutschland bzw. SIA Phase 32 in der Schweiz) werden die Informationen des Fachmodells Brandschutz sowie die dazugehörige externe Dokumentation, wie das Brandschutzkonzept, eingereicht. Durch die Modellsynchronisation wird dabei der aktuelle Planungsstand aller beteiligten berücksichtigt.

BIM IN DER BRANDSCHUTZPLANUNG

Anhand von ausgewählten Projekten wird nachstehend die praktische Umsetzung von BIM in der Brandschutzplanung erläutert. In vorliegendem Artikel wird dabei neben der «klassischen» konzeptionellen Brandschutzplanung auf die Themen Brandsimulationen und Heißbemessung eingegangen.

Erarbeitung von Brandschutzplänen im BIM-Projekt

Für das Neubauprojekt GRID, BaseLink in Allschwil (Schweiz) des Architekten Herzog & de Meuron (Bauherr Senn Resources AG) wurden Brandschutzpläne auf Basis des BIM-Modells erstellt. Der Gebäudekomplex GRID hat eine Grundfläche von 10.600 m² und eine Höhe von ca. 21 m. Es besteht aus 5 Ober- und einem Untergeschoss und wird als Gewerbe-, Büro- und Laborflächen genutzt (vgl. Abbildung 4).



Abbildung 4: Neubauprojekt GRID, BaseLink

Bei der Erstellung der Brandschutzdokumentation kam folgende Software zum Einsatz:

- Autodesk Revit
- Solibri Viewer & Modell Checker
- Autodesk Glue360
- Revizto.

Grundsätzlich stellt sich bei der Erstellung von Brandschutzplänen aus Revit die Frage, welche Information auf dem Brandschutzplan dargestellt werden muss und wie diese Darstellung umgesetzt wird. Eine 1:1-Umsetzung klassischer Brandschutzpläne ist nicht möglich, denn bei einem BIM-Modell liegen die Geometrieinformationen dreidimensional vor. Ein Grundriss eines Brandschutzmodells wird als Horizontalschnitt durch ein solches 3D-Modell erstellt.

Wie einleitend beschrieben legt die Brandschutzplanung eine Vielzahl von Anforderungen fest (z. B. den Feuerwiderstand einer Wand, die Qualität einer Tür oder die Brennbarkeit von eingesetzten Materialien). Eine konkrete Planung, z. B. der fraglichen Wand, ist aber durch andere Fachdisziplinen, im Fall der Wand durch Architektur und Tragwerksplaner, zu leisten.

Ein weiteres Beispiel ist die Anforderungen an die Ausführung einer Sicherheitsbeleuchtung im als Flucht- und Rettungsweg genutzten Treppenraum. Der Brandschutzplan enthält hier ein Zeichen, welches die Anforderung darstellt (vgl. Abbildung 5). Wird nun ein Horizontalschnitt erstellt und das Zeichen liegt nicht in der Schnittkoordinate, taucht es nicht im Plan auf.

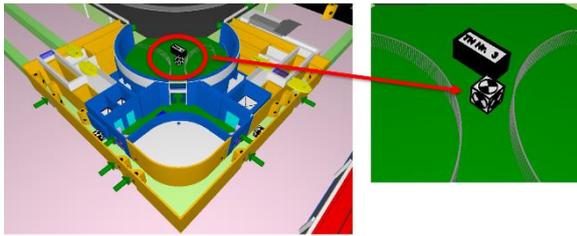


Abbildung 5: Beispiel für die dreidimensionale Darstellung der Anforderung an die Ausführung einer Sicherheitsbeleuchtung im Treppenraum

Auch die Darstellung von Türen erfordert eine andere Arbeitsweise. Je nach Anforderung müssen Türen auf einem Brandschutzplan anders dargestellt werden als im BIM Modell. So muss die Aufschlagsrichtung, die Bauteilqualität, Dichtigkeit bzw. Selbstschließung, eine mögliche Ansteuerung über die Brandfallsteuerung sowie allfällige Anforderungen an die Fluchtwegtauglichkeit dargestellt werden.

Bezüglich der Definition der Brandschutzparameter im BIM Modell verhält es sich wie folgt:

Die grafische Darstellung dient primär der Erstellung eines Brandschutzplans, der «klassisch» zur Baugenehmigung eingereicht wird. Die Definition der Attribute und deren Belegung mit konkreten Werten dient hingegen allen Planern im Sinne einer BIM-Planung. Eine solche Festlegung von Attributen mit Wertebereichen und weiteren Information ist am Beispiel von Türen mit Brandschutzanforderungen in Abbildung 7 dargestellt.

Parametrische Planung und Automatisierung

Die Potentiale der BIM-basierten Planung sind besonders bei einfachen Arbeitsschritten groß. So können anhand der festgelegten Attribute auf Grundlage von als Skripte umgesetzte Anforderungen des Brandschutzes berücksichtigt werden.

Wird beispielsweise eine Tür in eine brandabschnittsbildende Wand eingesetzt, erhält diese automatisch die entsprechenden Brandschutzanforderungen. Die brandabschnittsbildende Wand selbst kann wiederum auch durch ein Skript erzeugt werden, wenn die angrenzenden Räume z. B. die Attribute «Nutzung» und «horizontaler Fluchtweg / notwendiger Flur», besitzen.

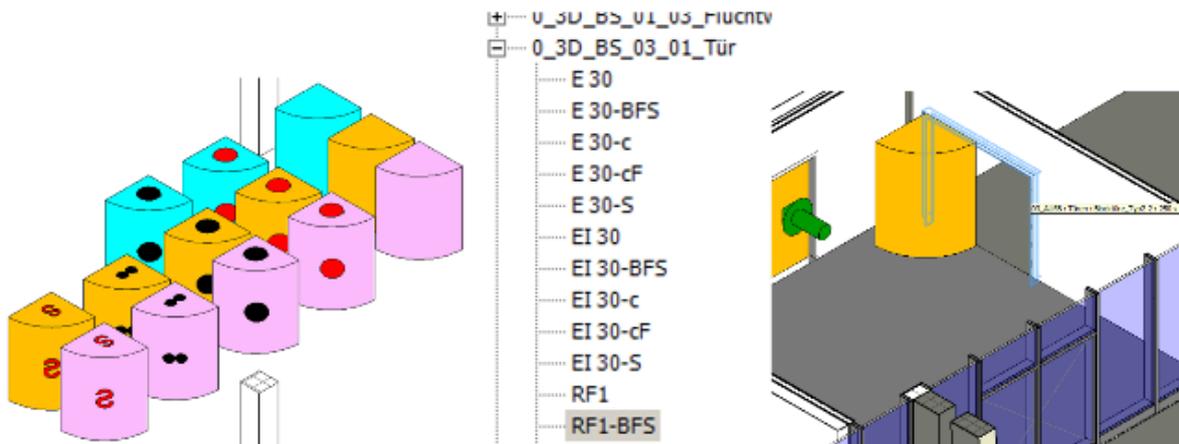


Abbildung 6: Darstellung von Türen im 3D-BIM-Modell

Element: Tür							Relevant in LOD					Verantwortlicher
Attribut	Bedeutung	Datentyp	Maßeinheit	Wertebereich	100	200	300	400	500			
BS_Tür_Brand	Feuerwiderstand	Label	-	fh / bh / fb		X	X	X	X	BS-Planer		
BS_Tür_Rauch	Rauchdichtigkeit	Label	-	d / rd			X	X	X	BS-Planer		
BS_Tür_Schließfunktion	Selbstschließfunktion	Boolean	-	I / O			X	X	X	BS-Planer		
BS_Tür_Breite	lichte Breite	PositivLength Measure	m	> 0,00 m		X	X	X	X	HV: Architekt NV: BS-Planer		

Abbildung 7: Ausschnitt von Attributen und Wertebereichen eines Objekts Tür im Fachmodell Brandschutz

Ingenieurmethoden im Brandschutz

Neben der klassischen Brandschutzplanung kommen vermehrt Ingenieurmethoden zum Einsatz, z. B. Brand- und Evakuierungssimulationen. Mit Hilfe dieser Methoden kann die Einhaltung der Schutzziele des Brandschutzes auch bei Abweichungen von den präskriptiven Vorschriften nachgewiesen werden. Der Einsatz von Ingenieurmethoden ist in der Regel mit einem erhöhten Aufwand und damit erhöhten Kosten verbunden, da oftmals ein 3D-Modell aufgebaut werden muss.

Im BIM-Planungsprozess dagegen liegt bereits ein solches Modell vor, welches über mittlerweile vorhandene Import-Schnittstellen in die jeweilige Software importiert werden kann. Auch wenn hier in der Regel Nacharbeiten erforderlich sind, kann hier bei komplexen Projekten ein Zeitgewinn gegenüber dem klassischen Planungsprozess erzielt werden.

Beispiele für eine Brandsimulation komplexer Strukturen auf Basis einer CFD-Simulation und einem BIM-Modell zeigen die Abbildung 8 und Abbildung 9.



Abbildung 8: Brandsimulation eines Nutzungseinheit in einer Turmstruktur auf Basis eines BIM-Modells

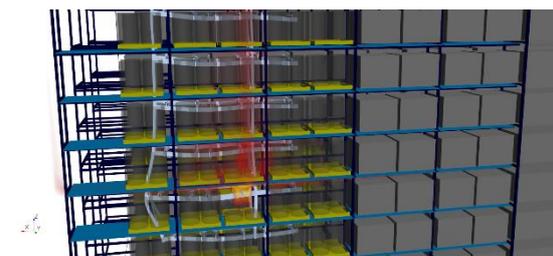


Abbildung 9: Brandsimulation eines Hochregallagers auf Basis eines BIM-Modells

Auch Evakuierungssimulationen können auf Basis von BIM-Modellen effizient durchgeführt werden, wie in *Abbildung* gezeigt.



Abbildung 10: Beispiel einer Evakuierungssimulation auf Basis eines BIM-Modells

Wie bei der konventionellen Brandschutzplanung liegt neben den dreidimensional vorhandenen geometrischen Informationen ein großes Potential in den vielen weiteren Informationen des BIM-Modells. So ist es aktuell seitens der Software umsetzbar, z. B. einer als Stahlbetonwand attribuierten Wand die thermischen Materialeigenschaften der EN 1992-1-2 zuzuordnen und automatisch dem CFD-Modell als Materialeigenschaft zuzuweisen.

AUSBLICK

Im Bereich der digitalen Planung findet derzeit eine rasante Entwicklung statt. Aktuell werden in konkreten BIM-Projekten allerdings nur Teile der vorhandenen Möglichkeiten genutzt. Ein Grund ist die hohe Komplexität und die Notwendigkeit, bereits in einer frühen Phase der Planung einen hohen Aufwand bei dem Aufsetzen der Strukturen des digitalen Modells zu investieren.

Zusätzlich werden etablierte und tradierte Fachdisziplinen, so auch der Brandschutz, über das gemeinsame digitale Modell gezwungen, neue und ungewohnte Arbeitsweisen und Prozesse anzuwenden.

Auch die Vielzahl an bestehender Software, welche nach und nach um Funktionen der BIM-Planung erweitert wird, erhöht aufgrund von proprietären und inkompatiblen Dateiformaten die Komplexität und Fehlerquelle im Planungsprozess.

Insgesamt überwiegen aber die Vorteile deutlich, sodass sich folgende Gebiete der Brandschutzplanung in Entwicklung bzw. Einsatz mit BIM-Planungsprozess befinden:

- *Brandfallsteuerungsmatrix*: Generierung der Brandfallsteuerungsmatrix direkt aus dem BIM-Modell.
- *Zonierungspläne*: Generierung von Zonierungsplänen direkt aus dem BIM Modell.
- *Ingenieurmethoden*: Verbesserung beim Import der Modelle zur Verwendung von Ingenieurmethoden.
- *Baustellenkontrolle*: Dank BIM to field hat man auf der Baustelle alle Pläne digital auf dem Tablet zur Verfügung.

LITERATUR

Leibich, T., Schweer, C.-S., Wernik, S. 2001. Die Auswirkungen von Building Information Modeling (BIM) auf die Leistungsbilder und Vergütungsstruktur für Architekten und Ingenieure sowie auf die Vertragsgestaltung,

Schlussbericht, im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumentwicklung (BBR), Deutschland.

SIA 2051. 2017. Schweizer Ingenieur- und Architektenverein. „ - Building Information Modeling (BIM) - Grundlagen zur Anwendung der BIM-Methode.“. Schweizer Ingenieur- und Architektenverein. Zürich, Schweiz.

Plum, A., Teske, P. 2020: Digitalisierte Brandschutzplanung mit der BIM-Methode. Vortrag Fire Safety Engineering 2020, Düsseldorf, Deutschland.

VIB. 2020. BIM Muster - AIA Einbindung der Brandschutzplanung in den Gesamtplanungsprozess mit Building Information Modelling. Verein zur Förderung der Ingenieurmethoden im Brandschutz. Stuttgart, Deutschland

BIM UND VERGABERECHT – EINE (UN)ÜBERWINDBARE HÜRDE?

D. Deutschmann¹

¹Heid und Partner Rechtsanwälte GmbH

E-Mail: office@heid-partner.at

Tel: +43 (0)1 9669 786

Fax: +43 (0)1 9669 790

KURZFASSUNG / ABSTRACT

Öffentliche Auftraggeber sehen sich im Rahmen ihrer Beschaffungstätigkeit zunehmend damit konfrontiert, mit der stetig fortschreitenden Digitalisierung Schritt zu halten. Der Einsatz von digitalen Methoden im Bauwesen – wie zB Building Information Modeling (BIM) – kann einen erheblichen und umfassenden Mehrwert über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes hinweg schaffen. Die Kunst des öffentlichen Beschaffers besteht darin, digitale Methoden und gesetzliche Vorgaben zu koordinieren, ohne dabei auf Kosten des „digitalen Mehrwerts“ zu agieren. Der vorliegende Beitrag soll daher einen Einblick in die vergabe- und vertragsrechtliche Umsetzung eines bereits erfolgreich abgewickelten BIM-Projekts eines öffentlichen Auftraggebers geben und aufzeigen, wie die Hürden des Vergabe- und Vertragsrechts bei BIM-Projekten überwunden werden können.

In the context of their procurement activities, public purchasers are increasingly confronted with the need to keep pace with the ever-increasing digitalization. The use of digital methods in the construction industry – such as Building Information Modeling (BIM) – can create a comprehensive, significant added value throughout the entire life cycle of the building. The art of public procurement is to coordinate digital methods and legal requirements without acting at the expense of „digital added value“. The present article therefore aims to provide an insight into the public procurement and contract law handling of an already successfully completed BIM-project of a public purchaser and to show how BIM and public procurement law can work together successfully.

EINFÜHRUNG

Im Bereich der öffentlichen Auftragsvergabe werden in Österreich jährlich über EUR 60 Mrd – und damit rund 18 % des BIP – beschafft (vgl *Bröthaler J./Plank L.*, 2017, 3). Innerhalb dieses Gesamtvergabevolumens kommt den öffentlichen

Aufträgen im Bauwesen eine besondere wirtschaftlichen Bedeutung zu: Im Durchschnitt sind rund 50% der gesamten öffentlichen Vergaben Bauaufträge (vgl *Bröthaler J./Plank L.*, 2017, 3). Außer Frage steht, dass der Einsatz von innovativen Technologien – so zB Building Information Modeling (BIM), Internet of Things (IoT) oder energetische und ökologische Gebäude- und Quartiersimulationen – maßgebliche Vorteile mit sich bringt, die im Vergleich zu den „traditionellen“ Prozessen des Planens, Bauens und Betriebens, eine effizientere, ressourcenschonendere und weniger fehleranfällige Abwicklung von Bauprojekten ermöglicht. Unsicherheiten bestehen bis dato allerdings hinsichtlich der Frage, wie eine praktikable Umsetzung innovativer Technologien im Rahmen von öffentlichen (Bau-)Auftragsvergaben erfolgen kann.

In Österreich gibt es bislang nur wenige Pilotprojekte, bei denen BIM als sogenanntes „as-built-Modell“ umgesetzt und im Anschluss in den Betrieb übernommen wurde. Für öffentliche Auftraggeber besteht – im Vergleich zu privaten Auftraggebern – die Herausforderung darin, dass ergänzend zu den bei Bauaufträgen allgemein zu beachtenden Rechtsvorschriften (zB [bundesländerspezifische] Bauordnungen, allgemeine zivilrechtliche Bestimmungen etc) auch die Bestimmungen des Vergaberechts zwingend zu berücksichtigen sind.

Ziel des vorliegenden Beitrags ist, anhand eines bereits erfolgreich abgewickelten BIM-Pilotprojekts darzustellen, wie eine vergabe- und vertragsrechtliche Umsetzung eines solchen Projekts durch öffentliche Auftraggeber gemäß Bundesvergabegesetz 2018 (Bundesgesetz über die Vergabe von Aufträgen, BGBl I 65/2018 idgF; in der Folge „**BVergG 2018**“) erfolgen kann.

BIM-PILOTPROJEKT „NEUBAU EINES SCHULZENTRUMS“

Im Rahmen des hier dargestellten Pilotprojekts wurde der Neubau eines Schulzentrums mittels der BIM-Planungsmethode realisiert. Bei der Planung wurde – im Hinblick auf eine bestmögliche Gestaltung des

Lebenszyklusses des neuen Gebäudes – ein ganzheitlicher Planungsansatz im Sinne einer integralen Planung gemäß den einschlägigen Leistungsbildern des Fachleitfadens „Leistungsbilder integrale Planung“ der IG Lebenszyklus Bau vorgenommen. Die Baukosten für das Projekt betragen rund EUR 55 Mio (exkl USt). Aufgrund des Umfangs und der Komplexität des Projektes wurde als Vergabestrategie festgelegt, **zwei (Haupt-)Vergabeverfahren** durchzuführen: Zunächst wurde ein Vergabeverfahren zur Findung eines Generalplaners (in der Folge „GP“) abgewickelt, der mit der Erbringung der Planungsleistungen beauftragt wurde. Auf Basis der Planungsleistungen des GP wurde nach Durchführung eines weiteren Vergabeverfahrens ein Generalunternehmer „Plus“ (in der Folge „GU“) mit der Erbringung der Ausführungsplanung und der Ausführungsleistungen beauftragt (näheres zu den Leistungsbildern des GP und des GU⁺ unter „Definition der (BIM-)Leistungsbilder“).

ZULÄSSIGKEIT DER WAHL EINES GEEIGNETEN VERGABEVERFAHRENS

In Österreich sind aktuell (noch) keine umfassenden Standardisierungen von BIM-Leistungsbildern vorhanden, was dazu führt, dass derzeit noch bei jedem mittels BIM zu realisierenden Projekt die sich daraus ergebenden projektspezifischen Besonderheiten im Vorfeld vom Auftraggeber festzulegen sind.

Einen ersten Schritt in Richtung Standardisierung von BIM-Leistungen setzt allerdings das Leistungsmodell „Objektplanung-Architektur + BIM“ (*Lechner H. /Heck D.*, 2017) [in der Folge „**LM.OA.BIM**“], welches im Rahmen der vom Institut für Baubetrieb, Bauwirtschaft, Projektentwicklung und Projektmanagement der Technischen Universität Graz herausgegebenen Leistungsmodelle und Vergütungsmodelle [in der Folge „**LM.VM**“] am 1.12.2017 veröffentlicht wurde. Das **LM.OA.BIM** enthält – ergänzend zum Standard-Leistungsmodell „Objektplanung-Architektur“ (*Lechner H. /Heck D.*, 2014) [in der Folge „**LM.OA**“] – BIM-Leistungsbilder für die Objektplanung, welche im Wesentlichen den optionalen Leistungen zu den Leistungsphasen 1 bis 9 zuzuordnen und damit individuell frei vereinbar sind (vgl *Lechner H. /Heck D.*, 2017, 4 ff).

Mangels standardisiertem, detailliertem Leistungsbild musste im vorliegenden Pilotprojekte für die Vergabe der BIM-Leistungen sowohl für den GP als auch für den GU⁺ jeweils eine Verfahrensart gewählt werden, die einen möglichst großen Spielraum für Gespräche und Verhandlungen zwischen dem Auftraggeber und den Bietern ermöglicht, um den erforderlichen Leistungsumfang gemeinsam hinreichend genau festzulegen. Für die Umsetzung von BIM-Projekten

im Oberschwellenbereich sind aufgrund des Verhandlungsverbots im offenen und nicht offenen Verfahren gemäß §§ 112 Abs 3 und 113 Abs 2 BVergG 2018 nur das Verhandlungsverfahren mit vorheriger Bekanntmachung (§ 31 Abs 5 BVergG 2018), der wettbewerbliche Dialog (§ 31 Abs 9 BVergG 2018) sowie die (neue) Innovationspartnerschaft (§ 31 Abs 10 BVergG 2018) geeignet. Da es sich bei allen in Frage kommenden Verfahrensarten um Ausnahmeverfahren handelt, ist bei jedem konkreten Projekt zu prüfen, ob eine dieser Verfahrensarten für die BIM-Vergabe zulässig gewählt werden kann.

Zu beachten ist, dass die dafür vorgesehene Rechtfertigungsgründe restriktiv auszulegen sind und das Vorliegen der Umstände, welche die Inanspruchnahme rechtfertigen, vom Auftraggeber dargelegt werden muss (vgl EuGH 10.3.1987, Rs C-199/85, *Kommission gegen Italien*, Rz 14; 18.5.1995, Rs C-57/94, *Kommission gegen Italien*, Rz 23; 14.9.2004, Rs C-385/02, *Kommission gegen Italien*, Rz 19; 2.6.2005, Rs C-394/02, *Kommission gegen Griechenland*, Rz 33; 13.1.2005, Rs C-84/03, *Kommission gegen Spanien*, Rz 48; 15.10.2009, Rs C-275/08, *Kommission gegen Deutschland*, Rz 55 f).

▪ **Wahl des Verhandlungsverfahrens mit vorheriger Bekanntmachung / Wettbewerblicher Dialog**

Mit dem BVergG 2018 wurde der Anwendungsbereich des Verhandlungsverfahrens mit vorheriger Bekanntmachung und des wettbewerblichen Dialoges deutlich erweitert. § 34 BVergG 2018 sieht für beide Verfahrensarten dieselben Ausnahmetatbestände vor.

Gemäß dem Rechtfertigungsgrund des § 34 Z 2 BVergG 2018 können in der Regel alle **Planungsleistungen** im Verhandlungsverfahren mit vorheriger Bekanntmachung bzw im wettbewerblichen Dialog vergeben werden, da „*der Auftrag konzeptionelle oder innovative Lösungen umfasst*“. Damit wird neben den „klassischen“ Planungsleistungen dieser Ausnahmetatbestand wohl auch für die Leistungen des BIM-Managers gegeben sein.

Für **Bauleistungen** wird in zahlreichen Fällen der Ausnahmetatbestand des § 34 Z 1 BVergG 2018 vorliegen, da die „*Bedürfnisse des öffentlichen Auftraggebers nicht ohne Anpassung verfügbarer Lösungen erfüllt werden können*“. § 34 Z 1 BVergG 2018 erfasst jene Sachverhalte, in denen der Auftraggeber nicht in der Lage ist, die Mittel zur Befriedigung seines Bedarfes zu definieren oder zu beurteilen, was der Markt an Lösungen zu bieten hat. Darüber hinaus sind aber auch all jene Fälle umfasst, bei denen der Auftraggeber die Lösungen des Marktes zwar kennt, diese aber für

seinen Bedarf optimieren möchte und diese Adaptionen nicht in einem offenen oder nicht offenen Verfahren herbeigeführt werden können (vgl EBRV 69 BlgNR XXVI. GP 66).

Bei Bauaufträgen, die sowohl **Ausführung als auch Planung** von Bauleistungen zum Gegenstand haben, ist der Rechtfertigungsgrund des § 34 Z 2 BVergG 2018 jedenfalls erfüllt (vgl die englische Fassung von Art 26 Abs 4 lit a sublit ii VergabeRL „they include design or innovative solutions“, welche in diesem Kontext bewusst den Wortlaut von Art 2 Abs 1 Z 6 lit a VergabeRL „design and execution of works“ aufgreift).

Bei **Bauaufträgen ohne Planungsdienstleistungselemente** ist zu prüfen, ob es sich bei diesen Leistungen um „Standardleistungen“ handelt oder um Bauleistungen, bei denen es nicht möglich ist, die für den Auftraggeber beste Lösung bzw das für den Auftraggeber beste Verfahren im Vorhinein zu identifizieren (vgl dazu EBRV 69 BlgNR XXVI. GP 66).

Im Ergebnis ist der Ausnahmetatbestand des § 34 Z 2 BVergG 2018 dann erfüllt, wenn es sich um keine Normbauten handelt. Es können daher wohl alle nicht standardisierten Leistungen in einem Verhandlungsverfahren mit vorheriger Bekanntmachung oder in einem wettbewerblichen Dialog beschafft werden (vgl EBRV 69 BlgNR XXVI. GP 66; Art 26 Abs 4 VergabeRL; Berger W./Zleptnig S. in Heid S./Preslmayr K., 2015, Rz 37).

▪ **Wahl der Innovationspartnerschaft**

Grundsätzlich wäre auch die (neue) Verfahrensart der Innovationspartnerschaft für die Abwicklung von BIM-Projekten geeignet.

Gemäß § 41 BVergG 2018 kann diese Verfahrensart aber nur im Zusammenhang mit der Entwicklung einer innovativen Ware, Bau- oder Dienstleistung gewählt werden. Voraussetzung ist, dass der Bedarf des Auftraggebers nicht durch „den Erwerb von bereits am Markt verfügbaren Waren, Bau- oder Dienstleistungen befriedigt werden kann“. Die Innovationspartnerschaft ist damit auf jene Konstellationen „zugeschnitten“, in welchen der öffentliche Auftraggeber eine innovative Leistung beschaffen möchte, die noch nicht am Markt verfügbar ist (vgl Ullreich S./Reisinger S. in Heid S. et al, 2019, § 41 Rz 1).

Diese Voraussetzung für die Anwendung der Innovationspartnerschaft wird bei BIM-Projekten wohl in der Regel (eher) nicht erfüllt sein, da es am Markt bereits „verfügbare Bau- und Dienstleistungen“ für BIM gibt. Eine Entwicklung vollkommen neuer innovativer Planungs- und Bauverfahren wird bei den meisten Projekten wohl nicht erforderlich sein.

In Anbetracht der obigen Ausführungen wurde für die beiden (Haupt-)Vergabeverfahren jeweils ein zweistufiges **Verhandlungsverfahren mit vorheriger EU-weiter Bekanntmachung** gemäß § 31 Abs 5 BVergG 2018 im Oberschwellenbereich durchgeführt.

MÖGLICHKEITEN FÜR DEN BIM-EINSATZ IM VERGABEVERFAHREN

Vor Projektbeginn ist eine Entscheidung darüber zu treffen, auf welche Weise den Projektbeteiligten der Einsatz von BIM vorgeschrieben werden soll bzw ist zu klären, wie der BIM-Einsatz im konkreten Projekt überhaupt zulässigerweise vorgeschrieben werden kann.

Im BVergG 2018 selbst finden sich keine spezifischen Regelungen zum Einsatz von BIM. In den Gesetzesmaterialien zum BVergG 2018 wird lediglich ausgeführt, dass es dem öffentlichen Auftraggeber „natürlich“ frei steht, „die Nutzung von BIM vorzuschreiben [...]“ (vgl EBRV 69 BlgNR XXVI. GP 81). Im Einklang mit der Richtlinie 2014/24/EU über die öffentliche Auftragsvergabe („**Vergaberichtlinie**“) ist daher auch auf nationaler Ebene klargestellt, dass der Einsatz von BIM auch von öffentlichen Auftraggebern verpflichtend vorgeschrieben werden darf. Bei der Abwicklung von BIM-Projekten durch private Auftraggeber kann eine Vorschreibung (weitgehend) auf beliebige Weise erfolgen. Im Anwendungsbereich des BVergG 2018 müssen allerdings insbesondere vor dem Hintergrund der Gewährleistung der allgemeinen Grundsätze des Vergabeverfahrens gemäß § 20 Abs 1 BVergG 2018 (Gleichbehandlung aller Bewerber und Bieter, Nichtdiskriminierung, Transparenz sowie der freie und lautere Wettbewerb), besondere Rahmenbedingungen für die verpflichtende Vorschreibung des BIM-Einsatzes eingehalten werden.

Der öffentliche Auftraggeber hat grundsätzlich folgende Möglichkeiten, den Einsatz von BIM im Vergabeverfahren verpflichtend vorzuschreiben (Heid S./Deutschmann D. in Rollett H./Gary G., 2017, 49 ff):

▪ **Vorgabe von BIM als technische Spezifikation in der Leistungsbeschreibung**

Der Auftrag kann in der Leistungsbeschreibung die Verwendung einer neutralen Software (ohne Produktbezeichnung) festlegen, welche die für BIM typischen technischen Spezifikationen erfüllt (zB digitale Abbildung der wesentlichen funktionalen Eigenschaften in einem zentralen Datenmodell, Erstellung von mehrdimensionalen Planungsergebnissen, etc). Wesentlich ist, dass die ausgeschriebenen Leistungen eindeutig, vollständig und neutral beschrieben sind bzw nicht so umschrieben sind, dass bestimmte Bieter von vornherein Wettbewerbsvorteile genießen. Insbesondere dürfen keine – für BIM-Projekte –

unsachlichen und üblichen Festlegungen getroffen werden (vgl zB VwGH 28.5.2008, 2007/04/0232; VwGH 17.6.2014, 2012/04/0032; VwGH 17.6.2014, 2012/04/0034; VwGH 26.2.2014, 2011/04/0168). Eine Einschränkung des Bieterkreises dadurch, dass möglicherweise nicht alle interessierten Bieter über eine den technischen Spezifikationen entsprechende BIM-Software verfügen, ist nach der Rechtsprechung des Europäischen Gerichtshofs unerheblich (vgl EuGH 17.9.2002, Rs C-513/99, Concordia Bus Finnland).

▪ **Vorgabe einer bestimmten BIM-Software oder eines „Leitprodukts“**

Gemäß § 98 Abs 7 BVergG 2018 darf in technischen Spezifikationen „nicht [...] auf Marken, Patente, Typen, [...] verwiesen werden, wenn dadurch bestimmte Unternehmer oder bestimmte Produkte begünstigt oder ausgeschlossen werden“. Nachdem es für die Umsetzung von BIM-Projekten verschiedene Softwarelösungen gibt, ist die Vorgabe einer bestimmten BIM-Software in den technischen Spezifikationen vergaberechtlich sohin wohl unzulässig. Ausnahmsweise sind produktspezifische Vorgaben ohne Gleichwertigkeitszusatz zulässig, wenn dies „durch den Auftragsgegenstand gerechtfertigt ist“ (§ 98 Abs 7 BVergG 2018). In Anlehnung an die deutsche Rechtsprechung sollten folgende Kriterien bei der Prüfung, ob die Vorgabe eines bestimmten Produktes durch den Auftragsgegenstand gerechtfertigt ist, beachtet werden (vgl OLG Düsseldorf 1.8.2012, VII-Verg 10/12; 27.6.2012, VII-Verg 7/12):

- Die Vorgabe muss sachlich gerechtfertigt sein;
- es müssen nachvollziehbare, objektive und auftragsbezogene Gründe angegeben worden sein, sodass die Bestimmung willkürfrei getroffen wurde;
- diese Gründe müssen auch tatsächlich vorhanden, festzustellen und notfalls erwiesen sein und
- die Vorgabe darf andere Wirtschaftsteilnehmer nicht diskriminieren.

Zusammengefasst sind die Voraussetzungen für die Vorgabe einer spezifischen BIM-Software **sehr eng auszulegen** und werden daher **nur in Ausnahmefällen vorliegen**.

Auch die Vorgabe einer bestimmten BIM-Software als Leitprodukt (zB indem dem Produkt der Zusatz „oder gleichwertig“ beigefügt wird) ist nur dann ausnahmsweise zulässig, „wenn der Auftragsgegenstand nicht hinreichend genau und allgemein verständlich beschrieben werden kann.“ Diese Ausnahme wird bei der Vorgabe einer BIM-Software in der Regel nicht vorliegen. Dennoch stellt die Vorgabe von Leitprodukten – entgegen der strengen vergaberechtlichen Vorgaben – eine gängige Praxis dar und wird vom Bietermarkt weitgehend akzeptiert (zur Anfechtung eines vorgegebenen Leitprodukts siehe aber zB BVA 24.5.2006, N/0025-BVA/04/2006-28).

▪ **Erstellung und Übergabe einer BIM-Datei als Teil des vom Auftragnehmer geschuldeten Leistungsumfangs**

Bei dieser Vorgehensweise erhält der Auftraggeber als Ergebnis eine BIM-Datei, deren konkrete Anforderungen in der Leistungsbeschreibung funktional beschrieben sind (zB Dateiformat, Beschreibung des Detailgrades). Der Auftragnehmer schuldet hier allerdings nur das Endprodukt, was bedeutet, dass der Auftragnehmer im Projekt selbst nicht zwingend mit BIM arbeiten muss, solange der Auftraggeber am Ende die gewünschte Datei mit den ausgeschriebenen Eigenschaften erhält. Aus vergaberechtlicher Sicht ist auch diese Variante unter Einhaltung der Voraussetzungen für die Vorgabe von BIM als technische Spezifikation in der Leistungsbeschreibung (siehe oben) zulässig.

▪ **Zurverfügungstellung der vom Auftragnehmer verpflichtend einzusetzenden BIM-Software durch den Auftraggeber**

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dass der Auftraggeber selbst eine BIM-Software beschafft und allen Beteiligten zu den gleichen Konditionen zur Verfügung stellt (vgl *Marboe P./Anderl T.*, 2015, 41). Aus vergaberechtlicher Sicht wird diese Vorgehensweise in der Regel zulässig sein sofern die Grundsätze des Vergabeverfahrens gemäß § 20 BVergG 2018 eingehalten werden. Auch die Ausführungen in den Gesetzesmaterialien sprechen für diese Ansicht, wonach die Nutzung von BIM „unter Einräumung eines alternativen Zuganges für den Unternehmer“ vorgeschrieben werden kann (EBRV 69 BlgNR XXVI. GP 81). Zu hinterfragen ist allerdings die Praxistauglichkeit dieser Variante. Wird durch den Auftraggeber eine bestimmte BIM-Software vorgegeben, mit der ein Unternehmen keine Erfahrung hat, kann sich dies – durch die damit erforderlich werdende Einarbeitung der Mitarbeiter in das neue

Programm – kostenerhöhend auswirken bzw würden sich womöglich nur Unternehmen bewerben, welche die vorgeschriebene BIM-Software bereits nutzen.

Im Ergebnis ist für jede beabsichtigte Vorgehensweise bei der Vorschreibung des BIM-Einsatzes eine genaue, einzelfallbezogene Prüfung dahingehend vorzunehmen, ob es durch die Festlegungen zu **keiner vergaberechtswidrigen Diskriminierung von Marktteilnehmern** kommt.

DEFINITION DER (BIM-)LEISTUNGSBILDER

Sogenannte Auftraggeber-Informations-Anforderungen (AIA), dienen im Wesentlichen der Definition der Ziele und der Anwendungsfälle des BIM-Projekts. Daraus leitetet sich im Weiteren die Anforderungen an die Modell- und Informationserzeugung ab (vgl *Goger G./Reismann W.*, 2018a, 2). Grundlage für die Gestaltung der gegenständlichen Ausschreibung waren die vom Auftraggeber erarbeiteten AIA. Aufgrund der Komplexität des Projekts wurden den Bietern die AIA im Rahmen verschiedener, thematisch strukturierter Dokumente zur Verfügung gestellt. So wurden die technischen Anforderungen (zB zum Projektraum, zu mögliche Dateiformate und erforderlichen Präzisionsgraden des BIM-Modells etc), die Abwicklung der Organisationsprozesse und die Terminplanung (zB Liefer- und Übergabezeitpunkte etc) maßgeblich im Rahmen der Leistungsbeschreibung (zB der Projektbeschreibung, der Bau- und Ausstattungsbeschreibung, der Raumbücher, der Panungskoordination, den Zeitplänen etc) festgelegt.

Der Einsatz von BIM stellt auch erhöhte Anforderungen an die Leistungsbeschreibung (und somit in weiterer Folge auch an die Vertragsgestaltung; siehe dazu unter „Zentrale verragsrechtliche Punkte“):

(BIM-)Leistungsbild GP

Das im Wesentlichen „klassische“ Leistungsbild des GP gemäß den LM.VM – insbesondere das Leistungsmodell LM.OA – wurde zum einen um die Erstellung eines BIM-Modells („as-planned-Modell“) ergänzt, also einem digitalen Modell des zu planenden Gebäudes, welches – im Gegensatz zum „as-built-Modell“ – den Soll-Zustand des Bauwerks vor seiner Errichtung abbildet und dokumentiert (vgl *Borrmann A. et al*, 2015, 581). Das „as-planned-Modell“ hatte im gegenständlichen Fall die GP-Planungsleistungen für die Objektplanung-Architektur, Tragwerksplanung und die technische Gebäudeausrüstung zu enthalten. Weiters waren vom GP jene Leistungen der Ausführungsplanung zu erbringen, welche für die Erstellung der funktionalen Leistungsbeschreibung des GU⁺ erforderlich waren sowie jene Qualitätssicherungsleistungen während der

Ausführungsphase, die für die Abwicklung im Rahmen eines GU⁺-Modelles erforderlich waren.

(BIM-)Leistungsbild GU⁺

Das vom GP bei der Planung erstellte BIM-Modell („as-planned-Modell“) war vom GU⁺ ab der Ausführungsplanung für alle Fachbereiche weiterzuführen und das Gebäude und die Bauteile in einem „as-built-Modell“ vollständig zu erfassen, welches den ist-Zustand des Bauwerks nach seiner Errichtung abbildet (vgl *Borrmann A. et al*, 2015, 581).

Sowohl GP als auch GU⁺ hatten bei der Erstellung bzw Weiterführung des BIM-Modells zwingend die BIM-Standards gemäß den Bestimmungen der ÖNORM A 6241-2 („Digitale Bauwerksdokumentation – Teil 2: Building Information Modeling [BIM] — Level 3-iBIM“) einzuhalten (Die ÖNORM A 6241-2 regelt in der Baupraxis relevante Fragen der Baudokumentation, basierend auf dem BIM Level 3. BIM Level 3 bezeichnet einen vollständig integralen, gemeinschaftlichen Prozess der Modellierung eines virtuellen Gebäudemodells, in Übereinstimmung mit der Ausführung für die Datenpflege über den gesamten Lebenszyklus, in einem gemeinsamen zentralen Datenmodell unter Einarbeitung von Sachdaten für weiterführende Informationen, die als zusätzliche Dimensionen beschrieben werden [vgl EBRV 69 B1gNR XXVI. GP 82]).

Der GU⁺ hatte darüber hinaus die Ausführungsplanung nach der ISO 19650-1 „Information management using BIM“ fortzuführen. In der Leistungsbeschreibung wurden weitere Anforderungen an das BIM-Modell festgelegt, die beispielsweise den erforderlichen Informationsgehalt und Detaillierungsgrad des Modells beschreiben (sogenannter „Fertigstellungsgrad“), wie zB Level of Information (LOI), , Level of Geometry (LOG) etc. (Näheres zum Fertigstellungsgrad unter „Festlegung des BIM-Abwicklungsmodells“).

Von Beginn des Projekts an wurde weiters für sämtliche Projektbeteiligte die verpflichtende Kommunikations- und Informationsabwicklung über einen spezifischen, vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten – und unter der Administration der Bauherrenbegleitung (BHB) betriebene – Kommunikations- und Dokumentationsplattform (sogenannter „Projektraum“) festgelegt. Bei diesem Projektraum handelte es sich um internetbasierte Plattform, mit der die Planfreigabe, -prüfung und -verteilung organisiert und die Kommunikation lückenlos nachvollzogen werden kann. Auf dieser Plattform erfolgte unter anderem auch die Erstellung und die Weiterführung des BIM-Modells. Für die erforderlichen BIM-Prozesse wurde im Projektraum ein eigenes BIM-Modul ergänzt, wodurch auf der Plattform mittels des offenen IFC-Standards über IFC-Dateien kommuniziert werden konnte.

FESTLEGUNG DES BIM- ABWICKLUNGSMODELLS

Das für ein Projekt festzulegende BIM-Abwicklungsmodell regelt die konkrete Vergabe- und Vertragsstrategie und stellt klar, in welcher Phase die Modellverantwortung bei welchem Projektbeteiligten liegt. Abhängig von dem für das Projekt gewählten Abwicklungsmodell, liegt die BIM-Modellverantwortung in den einzelnen Abwicklungsphasen bei unterschiedlichen Beteiligten:

- Verantwortung für das BIM-Modell bleibt beim GP (Variante 1);
- Verantwortung für das BIM-Modell geht vom GP auf den GU⁺ über (Variante 2);
- Planung des GP im 3D-Modell und Erstellung des BIM-Modells durch den GU⁺ (Variante 3).

Im gegenständlichen Pilotprojekt wurde als BIM-Abwicklungsmodell die „Variante 2“ umgesetzt. Damit lag die Verantwortung für das BIM-Modell zunächst beim GP. Mit Beauftragung des GU⁺ hatte dieser – in Abstimmung mit dem GP – den optimalen Übergangzeitpunkt des BIM-Modells vom GP auf dem GU⁺ zu bestimmen und verantwortete damit die optimale Planungsfortschreibung (wie zB bei Planungs- und Nutzungsänderungen). Auch die Verteilung der einzelnen Rollen (zB BIM-Koordinator und BIM-Manager) wurde vom GU⁺ (intern) selbstständig und in Eigenverantwortung vorgenommen. Die Modellverantwortung verblieb bis zur Übernahme des Bauwerks durch den Bauherrn und Übergabe des BIM-Modells beim GU⁺.

Für die Übergabe des BIM-Modells an den Bauherrn wurde in der Leistungsbeschreibung die Fertigstellungsgrade LOI 400 und LOG 200 festgelegt. Der Fertigstellungsgrad betrifft den Grad der Genauigkeit der Abbildung der einzelnen Bestandteile des BIM-Modells. Hierfür haben sich im Englischen die Begriffe „Level of Detail“ und „Level of Development“ etabliert (LOD beinhaltet LOI und LOG). Unterschieden wird international zwischen Fertigstellungsgraden nach LOD 100 (konzeptionelle Darstellung) bis LOD 500 (Dokumentation des ausgeführten Elements), die in etwa parallel zu den aus der HOAI bekannten Leistungsphasen verlaufen (vgl. *Elixmann R. in Eschenbruch K./Leupertz S., 2016, 100 f.*)

Als problematisch stellten sich im gegenständlichen Projekt die IFC-Schnittstellenlösung heraus, welche nicht gänzlich ohne Datenverluste funktionierte. Konkret haben manche Planungen mit der Übertragung ihre geometrischen Funktionen „verloren“. Dies hat dazu geführt, dass die ausführenden Unternehmen Teile der Planung neu aufsetzen mussten.

ZENTRALE VERTRAGSRECHTLICHE PUNKTE (BIM-BVB)

Wegweisend für die erfolgreiche Realisierung des BIM-Projekts waren die klaren, vertraglichen Regelungen für sämtliche Projektbeteiligte. Ergänzend zu den „klassischen“ Vertragsbestimmungen (Projektverträge, Generalplanerverträge, AVB, BVB etc) sind für die Umsetzung von BIM-Projekten **zusätzliche Vertragsbedingungen** festzulegen, welche die wesentlichen vertraglichen Anforderungen an sämtliche mittels BIM durchgeführten Leistungen (dh BIM-Planungs-, BIM-Ausführungs- und/oder BIM-Betriebsleistungen) einheitlich für alle Projektbeteiligten festlegen und konkretisieren. Es empfiehlt sich, für jedes BIM-Projekt ein in sich geschlossenes, „allgemeingültiges“ Vertragsregelwerk zu erstellen („**BIM-BVB**“), welches den Verträgen mit sämtlichen BIM-Projektbeteiligten (Planungs-, Ausführungs- und Betriebsbeteiligten) zu Grunde gelegt wird (vgl. *Heid S./Hofbauer B. in Goger G./Reismann, 2018b, 29 f.*)

Abhängig vom konkret festgelegten BIM-Abwicklungsmodell und der festgelegten Modellverantwortung, sind für die unterschiedlichen Projektbeteiligten unterschiedliche Vertragsbestimmungen erforderlich. Im Hinblick auf die „charakteristischen“ Leistungsbilder der Beteiligten sind BIM-BVB im Wesentlichen jeweils für **Auftraggeber** (für das Projekt), **Planer** (intern für seine Sub-Planer) und **Ausführende** (intern für seine Sub-Unternehmer) zu erstellen. Folgende vertragsrechtliche Punkte bedürfen erfahrungsgemäß einer besonders akribischen Behandlung:

Haftung bei Fehlern im BIM-Modell

Die Haftung bei Fehlern im BIM-Modell ist – mangels gegenteiliger Vereinbarung – derart ausgestaltet, dass jeder Projektbeteiligte für seine eigenen Leistungen und die ihm nachgewiesenen Fehler haftet. Eine gemeinsame Haftung der Beteiligten ist nicht vorgesehen. Es empfiehlt sich daher eine sorgfältige und klar definierte vertragliche Regelung, welche Beteiligten die Verantwortung für welche Leistungsbereiche übernehmen (vgl. dazu auch *Bodden J. in Eschenbruch K./Leupertz S., 2016, 172 ff mwN.*)

Gesetzliche Prüf- und Warnpflicht

Aufgrund der den Planern gemäß § 1168a Allgemeines bürgerliches Gesetzbuch (Allgemeines bürgerliches Gesetzbuch [ABGB], JGS 946/1811 idgF) obliegenden **gesetzliche Prüf- und Warnpflicht** sind bereits erbrachte Vorleistungen vor Leistungserbringung jedenfalls einer Prüfung zu unterziehen (vgl. *Karasek G.*, 2016, Rz 801). Kommt der Planer diesen Pflichten nicht nach, kann dies den Verlust des Entgeltanspruchs oder Gewährleistungs- bzw. Schadenersatzpflichten nach sich ziehen (vgl. *Brauneis A. in Goger G./Reismann W.*, 2018b, 50; *Karasek G.*, 2016, Rz 799 ff). Diese Verantwortung trifft beim im gegenständlichen Pilotprojekt festgelegten BIM-Abwicklungsmodell („Variante 2“; siehe unter „Festlegung des BIM-Abwicklungsmodells“) in besonderem Umfang den GU⁺, der die Planungsleistungen des GP im BIM-Modell übernimmt und aufbauend auf diesen das Modell fortführt.

Haftung für Softwarefehler

Bei der **Haftung für Softwarefehler** ist insbesondere auf die üblicherweise umfassenden vertraglichen Haftungsausschlüsse der Softwarehersteller hinzuweisen, die eine Durchsetzung von Ansprüchen aus Haftungsfällen oft erheblich erschweren. Setzen die am BIM-Projekt beteiligten Planer eigene BIM-Software ein, haften diese dem Auftraggeber – im Rahmen des sogenannten „Auswahlverschuldens“ – für das Resultat ihrer Arbeit, unabhängig von der konkreten Fehlerursache (zB auch eines Softwarefehlers).

Urheberrecht

Aufgrund des gemeinschaftlichen Zusammenwirkens der Projektbeteiligten, welche allesamt zum Entstehen des BIM-Gebäudemodells beitragen, werden auch spezifische **urheberrechtliche Fragestellungen** aufgeworfen. „*Werke der Baukunst*“ – worunter nach herrschender Ansicht auch BIM-Modelle selbst (sowie auch entsprechende Pläne, Entwürfe und das danach errichtete Gebäude) fallen – stellen grundsätzlich „*eigentümliche geistige Schöpfungen auf den Gebieten der [...] bildenden Künste [...]*“ dar (vgl. § 1 Abs 1 Urheberrechtsgesetz, BGBl 111/1936 idgF) und sind somit urheberrechtlich geschützt (vgl. *Neuwerth in Goger/Reismann*, 2018b, 54; *Karasek G.*, 2016, Rz 390). Darüber hinaus wird in den meisten Fällen eine „**Miturheberschaft**“ sämtlicher Beteiligter (zB Architekten, Fachplaner) an dem – als untrennbare Einheit anzusehenden – BIM-Modell begründet (vgl. § 11 Abs 1 UrhG; *Karasek G.*, 2016, Rz 390; *Hömmle G. in Eschenbruch K./Leupertz S.*, 2016, 200 f). Betreffend die Nutzungsrechte am BIM-Modell wird in der österreichischen Rechtsprechung zwar die sogenannte „**Zweckübertragungstheorie**“ vertreten, wonach „[d]er Urheber [...] die Nutzung

seines Werks nicht untersagen [kann], wenn er dem Nutzer – ausdrücklich oder schlüssig – ein Werknutzungsrecht [...] oder eine Werknutzungsbewilligung [...] eingeräumt hat. [...] Wird ein Werk im Auftrag eines anderen geschaffen, so wird damit jedenfalls schlüssig das Recht eingeräumt, das Werk zu dem Zweck zu verwenden, zu dem es in Auftrag gegeben wurde“ (vgl. OGH 19.11.2009, 4 Ob 163/09p mwN; § 24 UrhG). Eine vertragliche Einräumung von Nutzungsrechten (in Form von Werknutzungsrechten bzw. einer Werknutzungsbewilligung) zugunsten des Auftraggebers wird dennoch dringend angeraten, damit der Auftraggeber Rechtssicherheit für die weitere Nutzung und Bearbeitung des BIM-Modells hat.

Zusammengefasst ist auf eine sorgfältige und gewissenhafte Erstellung der vertraglichen Regelwerke besonderes Augenmerk zu legen. Dies insbesondere vor dem Hintergrund, dass sich – wie bereits im Detail unter „Definition der (BIM-) Leistungsbilder“ ausgeführt – mangels standardisierten Leistungsbildern die Aufgabenverteilungen in BIM-Projekten noch nicht entsprechend „etabliert“ haben und eine erhöhte Sensibilität für die neuartigen Arbeitsabläufe zu komplexen Vertragsauslegungen und Rechtsstreitigkeiten führen kann.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Ergebnis hat die Abwicklung des gegenständlichen Forschungsprojekts gezeigt, dass BIM und Vergaberecht gemeinsam überaus erfolgreich funktionieren können und dass auch bei Projekten von öffentlichen Auftraggebern unter Berücksichtigung der einschlägigen vergaberechtlichen Rahmenbedingungen mit dem Einsatz von BIM ein erheblicher – und vor allem nachhaltiger – Mehrwert geschaffen werden kann.

Die wesentlichen praxisrelevanten Ergebnisse und Erfahrungen aus dem dargelegten Projekt wurden im gegenständlichen Beitrag aufbereitet, um eine mögliche Herangehensweise an derartige Projekte zu demonstrieren. Unter Berücksichtigung dieser Erfahrungswerte führt der gleiche Auftraggeber aktuell ein neues Forschungsprojekt durch, von dem bis September 2020 erste Ergebnisse zu erwarten sind.

LITERATUR

- Borrmann A./König M./Koch C./Beetz J., 2015. Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis.
- Bröthaler J./Plank L., 2017. Öffentliche Vergaben in Österreich – Methodische Grundlagen und empirische Ermittlung des gesamten Beschaffungsvolumens und öffentlicher Auftragsvergaben – Endbericht.
- Eschenbruch K./Leupertz S., 2016. BIM und Recht.
- Goger G./Reismann W., 2018a. Plattform 4.0: Planen.Bauen.Betreiben – Arbeit.Wirtschaft.Export, Schrift 12 – BIM in der Praxis – Auftraggeber-Informationen-Anforderungen AIA.
- Goger G./Reismann W., 2018b. Plattform 4.0: Planen.Bauen.Betreiben – Arbeit.Wirtschaft.Export, Schrift 13 – Digitalisierung & Recht.
- Heid S./Preslmayr K., 2015. Handbuch Vergaberecht, 4. Auflage.
- Heid S./Reisener H./Deutschmann D./Hofbauer B., 2019. Kommentar zum Bundesvergabegesetz 2018.
- IG Lebenszyklus Bau, 2016. Fachleitfaden - Leistungsbilder integrale Planung; http://www.ig-lebenszyklus.at/wp-content/uploads/2018/08/Fachleitfaden_IP_2016.pdf
- Karasek G., 2016, Kommentar ÖNORM B 2110, 3. Auflage.
- Lechner H./Heck D., 2014. Leistungsmodell Objektplanung – Architektur [LM.OA] 2014.
- Lechner H./Heck D., 2017. Leistungsmodell Objektplanung – Architektur [LM.OA.BIM] 2014.
- Marboe P./Anderl T., 2015. bauaktuell: BIM-Grundlagen im Vergabe- und Werkvertragsrecht.
- Rollett H./Gary G., 2017. BIM – Digitale Revolution und ihre Grenzen.

EINBINDUNG DER BAUPHYSIKALISCHEN FACHBEREICHE SCHALL-, FEUCHTE- UND BRANDSCHUTZ IN DEN BIM-PLANUNGSPROZESS

S. Wieder¹, M. Gratzl² und T. Reiter³

¹Ingenieurbüro Zauner, 5020 Salzburg, Österreich

²Ingenieurbüro Gratzl, 4715 Traufkirchen, Österreich

³FH Salzburg, Studiengang Smart Building, 5431 Kuchl, Österreich

KURZFASSUNG

Durch die interdisziplinäre Abwicklung und die Digitalisierung des Planungsprozesses in Folge der Einführung von Building Information Modelling (BIM) entstehen wesentliche Änderungen bei der Einbindung von Fachplanern in der alltäglichen Planungstätigkeit. Darum beschäftigt sich die vorliegende Untersuchung mit dem Status-Quo der Nutzung von BIM-Daten im Bauphysik-Planungsprozess mit Fokus auf die Fachbereiche Schall-, Feuchte und Brandschutz. Ein wichtiger Punkt ist hier die Datenübergabe und die dazu verwendeten Softwareprogramme. Um die Einbindung zu gewährleisten, müssen zuerst die erforderlichen Untersuchungen der fachspezifischen Bereiche definiert und in die jeweiligen Planungsphasen eingeteilt werden. Anschließend wird ein unabhängiges Austauschformat benötigt um die Informationen auch in das Modell einbinden zu können. Dieser Vorgang wird in dieser Arbeit anhand des BCF-Formates beschrieben.

ABSTRACT

The interdisciplinary handling and digitalisation of the planning process as a result of the introduction of Building Information Modelling (BIM) has led to significant changes in the integration of professional planners in their daily planning activities. Therefore, the present study deals with the status quo of the use of BIM data in the building physics planning process. An important point here is the transfer of data and the software programs used for this exchange. In order to ensure integration, the necessary investigations of the specific fields must first be defined and divided into the respective planning phases. Then an independent exchange format is needed to be able to integrate the information into the model. This process is described in this paper by using the BCF format.

EINLEITUNG

Aufgrund der zunehmenden Digitalisierung in vielen Bereichen der Wirtschaft spielt auch die Vernetzung der digitalen Daten in der Baubranche eine immer größere Rolle. Bei vielen fachspezifischen Projektbeteiligten wird Building Information Modeling (BIM) bereits in der Praxis angewendet.

Mittlerweile werden geometrische und alphanumerische Informationen in einer projektspezifischen Datenbank abgelegt, auf die alle Planungsbeteiligten zugreifen und auch Änderungen darin veranlassen können. Dabei ist es von zentraler Bedeutung, einerseits Zugriff auf die für die eigene Planung relevanten Informationen zu erlangen und andererseits eine klare definierte Einbindung der eigenen Leistungen in den übergeordneten Planungsprozess zu gewährleisten.

Diese Punkte spielen für den Fachbereich der Bauphysik eine große Rolle. Für die bauphysikalischen Untersuchungen müssen relevante Informationen aus dem IFC-Modell verfügbar sein, ebenfalls müssen die Einbindemöglichkeiten in den Planungsprozess definiert und die Schnittstellen eindeutig festgelegt sein. Momentan wird der Fachbereich Bauphysik nur nachrangig in den BIM-Prozess integriert, ein aktiver Datenaustausch wird üblicherweise nur für thermische Gebäudesimulation angewendet. Jedoch weisen bauphysikalische Untersuchungen ein breites Spektrum an relevanten Output-Dateien im Planungsprozess auf. Für diese Informationen, sofern sie für den weiteren Prozess relevant sind und nicht nur als Nachweis dienen, gibt es bis jetzt nur geringe Einbindemöglichkeiten. Diese Arbeit beschäftigt sich aufgrund dieser Hindernisse mit Möglichkeiten zur Einbindung von bauphysikalischen Untersuchungen.

Für einige Fachbereiche der Bauphysik, beispielsweise die thermische Gebäudesimulation, sind bereits Einbindemöglichkeiten vorhanden und durch eine große Auswahl an Literatur beschrieben (O. Oduyemi & M. Okoroh, 2016) (R. Maskil-Leitan & I. Reyhav, 2018). Ein reibungsloser und automatisierter Einbindeprozess ist dadurch jedoch im Planungsalltag nicht gegeben. Fachbereiche wie Schall-, Feuchte- und Brandschutz werden bisweilen nur sehr selten in den BIM-Planungsprozess eingebunden. Ziel dieses Artikels ist das Aufzeigen von Möglichkeiten der Einbindung von bauphysikalischen Untersuchungen der Fachbereiche Schall-, Feuchte- und Brandschutz. Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen darstellen, zu welchem Zeitpunkt welche bauphysikalischen Untersuchungen eingebunden werden und der jeweilige

Detailierungsgrad wird dabei definiert. Ebenfalls wird bei einem dokumentierten Einbindevorgang aufgezeigt, ob zwischen unterschiedlichen Softwareprogrammen Übermittlungsfehler aufgrund der Schnittstellen auftreten.

HINTERGRUND

Durch den aktuellen Planungsprozess entstehen viele Fehlerquellen, die auch zu schwerwiegenden Problemen führen können. Das manuelle Prüfen der Planunterlagen stellt aufgrund der Vielzahl von Fachplanern und dementsprechend auch unterschiedlichen Plänen eine große Herausforderung dar. Änderungen in den Planungsphasen werden meist nur durch eine Notiz gekennzeichnet, der Plan jedoch nicht abgeändert. Somit wird die Änderung nicht an alle Beteiligten weitergeleitet und zur Kenntnis genommen. (Borrmann et al., 2015)

Hier kommt das Building Information Modeling (BIM) ins Spiel. Um eine Zusammenarbeit mit allen Planungsbeteiligten zu ermöglichen, wird ein unabhängiges Austauschformat für die Übermittlung der Informationen benötigt. Das am häufigsten angewendete offene Datenformat für eine Übertragung mit unterschiedlichen Softwareprogrammen ist das *Industry Foundation Classes (IFC)*. Dieses wurde von der internationalen Organisation buildingSMART entwickelt und findet weltweite Anwendung. (A. Niedermaier & R. Bäck, 2018)

Fachbereich Bauphysik

Im aktuellen Prozess der Bauphysik werden vor allem Nachweise und Zertifizierungen erbracht, ein 3D-Gebäudemodell ist nur bedingt notwendig. Falls Nachweise nicht erfüllt werden, wird mit dem zuständigen Projektbeteiligten über die vorzunehmenden Änderungen Rücksprache gehalten. (Zanotto, 2016)

Ein wesentliches Problem für die Nutzung eines BIM-Modells ist der aktuell linear verlaufende Planungsprozess in der Bauphysik. Änderungen während des Planungsprozesses werden immer neu importiert oder manuell eingegeben. In einzelnen Fällen ist dieser Austausch hinsichtlich der BEM bereits gut beschrieben, jedoch sind dies meist Demonstrationsanwendungen von Softwareanbietern, Forschungsprojekte oder Musterlösungen von BIM-Experten.

Da die Fachbereiche der Bauphysik sehr umfassend sind, werden nachfolgend einige davon näher beschrieben und die derzeit angewendeten Einbindungen erläutert.

Thermische Gebäudesimulation

Durch den hohen Aufwand der geometrischen Modellierung im 3D-Modell als Grundlage einer thermischen Gebäudesimulation ist hier ein großes Bestreben vorhanden, die im BIM-Modell bereits

vorhandenen Daten so gut wie möglich zu nutzen. Durch diese Wechselwirkung von BIM und Gebäudesimulation (BEM = building energy modeling) beschäftigen sich die Wissenschaft bereits seit vielen Jahren mit der Einbindung von BIM-Daten in BEM-Modelle.

Chen et al. (2018) beschreiben die generellen Möglichkeiten für den Datenaustausch zwischen BIM- und BEM-Modellen. Dabei haben sich zwei Austauschformate bewährt, das Green Building XML Schema (gbXML) und das Industry Foundation Classes (IFC). Beide Formate unterstützen verschiedene Softwareprogramme wie Revit, Bentley, ArchiCAD und Simulationsprogramme. (Chen et al., 2018)

Einen Vergleich der Formate gmXML und IFC zeigt das Paper von Ivanova et al. (2015) auf. Es werden zwei Programme, Autodesk Revit und Graphisoft ArchiCAD als Modellierungsprogramm gewählt. Beide Programme exportieren jeweils eine IFC- und gmXML-Datei für den anschließenden Import als IDF-Datei (3D-CAD-Austauschformat) in das Simulationsprogramm EnergyPlus. Die Vorgänge werden anschließend verglichen und auf die Korrektheit überprüft. Bei der Untersuchung stellt sich klar heraus, dass die Genauigkeit beim Erstellen des Gebäudemodells stark den Übertragungsprozess zwischen den Softwareprogrammen beeinflusst. Für einen Austausch mit einer IFC-Datei ist wichtig, dass die Informationen im BIM-Modell nach der IDM-Struktur (Information Delivery Manual, Struktur der Arbeitsprozesse) ausgerichtet sind. Ebenfalls wird für einen optimalen Workflow zwischen BIM und BEM ein Fachwissen der Anwender vorausgesetzt. (Ivanova et al., 2015)

W.Joeng et al. (2014) beschreiben einen automatisierten Einbindeprozess von BIM zu BEM mithilfe des buildingSMART-Standards Model View Definition (MVD). Es wird dabei eine nahtlose Modellübersetzung von Geometrie und Materialien ermöglicht. Die erstellte MVD besteht aus einem festgelegten Koordinationsmodell und einem definierten Klassenstruktur (W. Joeng et al., 2014)

Schall-, Feuchte- und Brandschutz

In den Fachbereichen Schall-, Feuchte- und Brandschutz gelten als Standard-Outputs Nachweise und Berechnungen. Um diese in das BIM-Modell einzubinden, kann das unabhängige BIM Collaboration Format (BCF) von der Organisation buildingSMART verwendet werden. Diese Format ermöglicht einen einfachen Datenaustausch zwischen verschiedenen Softwareprodukten basierend auf dem IFC-Format.

BIM Collaboration Format

Bis 2010 standen viele BIM-Anwender vor dem Problem, wie Änderungen und auftretende Fragestellungen in einem Modell, für alle sichtbar

dargestellt und untereinander kommuniziert werden können. Bei Veränderungen wurden bis dahin die Modelle untereinander ausgetauscht und die Neuerungen mussten durch Vergleich der Modellversionen herausgefiltert werden – eine sehr zeitintensive Arbeit. Die Softwarehersteller Solibri und Tekla erkannten das Problem und begannen, ein offenes unabhängiges Dateiformat zu entwickeln. Die Idee und Entwicklung wurde dann von der Organisation buildingSMART übernommen und weiterentwickelt. (A. Niedermaier & R. Bäck, 2018)

Die jeweiligen Fachplaner können mittels BCF Anmerkungen und Änderungsvorschläge in ein einheitliches Koordinationsmodell einbinden. Das Format tauscht nicht das Modell selbst aus, sondern nur bestimmte Informationen dazu. Die Datei besteht nur aus codierten Nachrichten und minimiert somit die Datenmenge um ein Vielfaches.

Die BCF-Datei selbst ist ein ZIP-File (*.bzfzip) und besteht aus den Komponenten:

- markup.bcf – Datei mit textlichen Inhalt
- viewpoint.bcf – Visualisierungsinformationen
- snapshot.png – Screenshot

In der Datei mit dem textlichen Inhalt wird die Priorität festgelegt, dort kann zwischen comment, issue, request oder solution gewählt werden. Ebenfalls wird der Status (open, in progress, closed, reopend) der Datei festgelegt. In den Visualisierungsinformationen wird der Verweis im Gebäudemodell auf das zugehörige Objekt hinterlegt. Mit einem hinterlegten IFC-ID wird allen Projektbeteiligten aufgezeigt um welches Objekt es sich handelt und dadurch werden Missverständnisse minimiert. Zu jeder koordinatenhinterlegten Modellansicht ist zusätzlich ein Screenshot hinterlegt, der die genau abgespeicherten Darstellungen wiedergibt. Diesen Screenshot können auch Beteiligte ohne eine BCF-kompatible Software erhalten und die darin visuellen Informationen und die Lage des Objektes im Modell einsehen. (A. Niedermaier & R. Bäck, 2018)

Die BCF-Datei selbst kann als Ergebnis, um Kollisionen darzustellen, einer IFC-Modellüberprüfung oder auch durch einen Projektbeteiligten als Aufgabe oder Problem erstellt werden. Diese erzeugten Aufgaben können über Online-Plattformen wie zum Beispiel BIMCollab ausgetauscht werden. (BIMCollab, 2020)

METHODIK

Um eine Einbindung von bauphysikalischen Untersuchungen in den BIM-Prozess zu ermöglichen, ist es erforderlich, die verschiedenen Fachbereiche der Bauphysik auf die verfügbaren Softwareprogramme

und deren Funktion hinsichtlich des BIM-Modellimports zu untersuchen. Die jeweiligen Programme werden in der Tabelle 1 dargestellt.

Bereits eine große Menge erforderliche Informationen für bauphysikalische Untersuchungen sind in der IFC-Struktur angelegt. Eine strukturierte Einbindung in den BIM-Prozess ist theoretisch zum jetzigen Zeitpunkt gut möglich. Beeinträchtigt wird dies jedoch durch die praktischen Einschränkungen vom Detaillierungsgrad, der Modellkoordination, der Zuständigkeiten, der Software-Einschränkung und der Fachkenntnisse bei Bauphysikern. Darum wird in der Untersuchung auch die erforderliche Datenstruktur behandelt.

Der nächste Schritt ist die Einteilung der bauphysikalischen Untersuchungen in die jeweiligen Planungsphasen und das Festlegen des geforderten Detaillierungsgrades. Es wurde eine Abhängigkeitsmatrix erstellt, die den Bereich Schallschutz näher beschreibt. Dabei werden die benötigten Informationen für die Untersuchung als Input definiert und die Ergebnisse als Output festgelegt. Die angewendeten Planungsphasen werden an das Leistungsmodell Bauphysik angelehnt und gehen von der Grundlagenermittlung bis zur Bauausführung. Somit kann in einem BIM-Planungsprozess klar definiert werden, welche Informationen zu welchem Zeitpunkt und welches LOI (Level of Information) erforderlich ist.

Da die Wechselwirkung zwischen BIM und BEM bereits weitgehend untersucht ist, wird in dieser Arbeit das BCF-Format zur Einbindung von Änderungsvorschlägen oder Anmerkungen behandelt. Es wird der Einbindevorgang des Formates mit den Programmen ArchiCAD, Solibri Model Checker und dem BCF-Manager von BIMCollab beschrieben.

SOFTWAREPROGRAMME UND SCHNITTSTELLEN

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass fast alle Programme in den verschiedenen Bereichen zumindest ein 3D-Modell darstellen können. Im Bereich Schallschutz und Raumakustik gibt es bereits 3D-Simulationsprogramme, die eine CAD Schnittstelle für den Import und als Export eine 3D-Ansicht anbieten. Der Bereich Feuchteschutz beruht größtenteils auf 1D- und 2D-Berechnungen und geben Nachweise und 2D-Simulationen aus.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass für den BIM-Prozess wenig relevante Informationen als Ergebnisse der Untersuchungen exportiert werden können jedoch viele Programme ein bestehendes 3D-Modell für die Simulation importieren können.

Tabelle 1: Softwareprogramme und 3D-Schnittstellen

SOFTWARE	HERSTELLER	3D-MODELL	ANMERKUNGEN
Thermische Gebäudesimulation			
IDA ICE	EQUA Simulaiton AB	IFC Import und Export	Multizonale Simulationsanwendung, Energieverbrauch, Komfort
TRNSYS	TESS (Thermal Energy System Specialists)	SketchUp (IDF), Rhino Grasshoper	Dynamische Gebäudesimulation, multizonal, thermische Anlagensimulation, gekoppelte Gebäude- und Anlagensimulation
energyPLUS	NREL	gbXML, SketchUp (IDF)	Multizonales Gebäude- und Anlagensimulationsprogramm
DesignBuilder	DesignBuilder Software Ltd	gbXML	Gebäude- und Anlagensimulationsprogramm
TAS	EDSL	gbXML, IDF, DWG	Gebäude- und Anlagensimulationsprogramm
Schallschutz			
Bastain	Dataakustik	Schnittstelle zu CadnaA, 3D-Ansicht	Bauakustik, Luft- und Trittschallübertragung und Außenschallübertragung
CadnaA	DataKustik	Import: CAD-/ GIS-Dateien, Textformat; Export: 3D-Viewer, DXF, Textformat	Berechnung von Umgebungslärm
CadnaR	DataKustik	Import: SketchUp, DWG, DXF, Textdatei; Export: 3D-Viewer, Textdatei	Beurteilung von Schall in Räumen
SONarchitect ISO	Sound of Numbers	3D Modell, Schnittstelle zu Odeon (Raumakustik)	Bauakustik, Luft- und Trittschallübertragung,
Raumakustik			
CATT-Acoustic	CATT	3D-Viewer; Plugin für Import von SketchUp-Dateien	Schallausbreitung, Nachhallzeit, Raumweise Raumakustikplanungen
Auratorium	Audioborn GmbH	3D-Viewer	Im CAD-Programm integrierte Echtzeit-Akustiksimulationssoftware
Odeon	Odeon A/S	Import: SketchUp und CAD Dateien, 3D-Viewer	Raumakustik-Simulation (Innenräume)
EASE	AFMG Technologies	Import: SketchUp, DXF-Dateien; Export: 3D-Viewer, DXF	Raumakustische Simulation von Innenräumen und Freiflächen
AUVIS	IRT GmbH	3D-Darstellung	Raumakustische Simulationssoftware
Ulysses	IFB Soft	3D-Darstellung	Raumakustische Simulationen
Bauteilsimulation, Feuchteschutz			
Antherm	Antherm	Import: DXF, IFC, Export: 3D-Viewer	Wärmebrückensimulationssoftware, dynamisches Verhalten von Bauteilen
WUFI	Fraunhofer-Institut IBP	1D/2D-Darstellung und Berechnung	instationäre hygrothermisches Verhalten von Bauteilen und Gebäuden unter natürlichen Klimabedingungen
Delphin	Institut für Bauklimatik Dresden	1D/2D-Berechnung, teilweise 3D-Darstellung	Simulationsprogramm für den gekoppelten Wärme-, Luft-, Feuchte-, Schadstoff- und Salztransport in Bauteilen
Cond	Institut für Bauklimatik Dresden	1D Berechnungen, Nachweise	Feuchteschutznachweis, Schimmelwachstumsriterien, hygrothermisches Beurteilungsprogramm
Flixo	Infomind GmbH	DXF-Im- und Export, 1D/2D-Darstellung und Berechnung	Wärmebrückenberechnungen, U-Wert Berechnungen
Brandschutz			
Autodesk CFD	Autodesk Inc.	Import: CAD-Datei, 3D-Darstellung	Brand-, Entrauchungs- und Evakuierungssimulation
ANSYS Fluent	ANSYS, Inc.	Import: CAD-Datei, 3D-Darstellung	CFD-Programm, numerische Strömungssimulation;
PyroSIM	Thunderhead Engineering	Import: CAD- und IFC-Dateien, 3D-Viewer und Simulationen	Feuer- und Rauchsimulation
Pathfinder	Thunderhead Engineering	Import: CAD- und IFC-Dateien, 3D-Viewer und Simulationen	Fluchtwegesimulation

UNTERSUCHUNG

Datenstruktur

Für die Berechnung von bauphysikalischen Untersuchungen werden gewisse Daten für die zu führenden Nachweise vorausgesetzt. Diese Informationen werden für die jeweilige spezifische Berechnung vom Bauphysiker selbst eingeholt, wobei sich die Arten des Datenformates in den verschiedenen Fachbereichen voneinander unterscheiden. Hierbei sind beispielsweise Kennwerte der Bauteile bzw. die Bauteilaufbauten selbst und Angaben zur Nutzung notwendig.

Ein wichtiger Punkt ist dementsprechend die Verfügbarkeit der Daten. Anforderungen für die verschiedenen Fachbereiche werden aus den relevanten ÖNORMEN bzw. aus der jeweiligen OIB-Richtlinie bezogen, sofern keine erhöhten Anforderungen vereinbart werden.

Um eine bauphysikalische Untersuchung durchführen zu können werden für ein Großteil der Berechnungen die Gebäudegeometriedaten vorausgesetzt. Diese können in verschiedenen Formaten für die jeweiligen Fachbereiche übergeben werden. Hier ist die ausreichende Kommunikation unter den Planern eine Grundvoraussetzung für einen optimalen Planungsprozess.

Materialdaten werden selten vor der bauphysikalischen Untersuchung genauer festgelegt. Die Angaben und genauen Werte der geplanten Materialien werden in der Untersuchung erst angegeben.

Bei den Ergebnissen der bauphysikalischen Untersuchungen muss unterschieden werden zwischen relevanten Informationen für den weiteren Planungsprozess oder die Nachweise, die lediglich für die bauphysikalischen Untersuchungen relevant sind. Falls die Ergebnisse in den Planungsprozess eingebunden werden sollen, stellt sich die Frage auf welche Art und Weise dies passiert. Hier ergibt sich das Problem der Datenzugehörigkeit des Modellinhabers. Der bauphysikalische Planer hat in den meisten Fällen nicht die Berechtigung die Bauteilkennwerte im Modell zu ändern oder anzupassen.

Die Datenverfügbarkeit hinsichtlich der IFC-Struktur wird nach der Art der Herkunft unterteilt:

- Zentrale Modelldaten: z.B. Geometriedaten, Eingangsgröße der Untersuchung, können nicht direkt geändert werden
- Ergänzende Modelldaten: z.B. Materialkennwerte der Bauteile, Ergebnisse der Untersuchung
- Erweiterte Modelldaten: z.B. thermische Simulationsergebnisse, unterliegen der Zuständigkeit des Bauphysikers

Einbindung in den Planungsprozess

Die Durchführbarkeit der standardisierten Einbindung des Fachbereiches Bauphysik wird durch eine Vielzahl von Randbedingungen bestimmt. Hier sind die Importdateien aus dem BIM-Planungsprozess und Export-Dateien für das BIM-Modell von einigen Faktoren abhängig, angefangen damit in welcher Planungsphase sich das Projekt befindet, welche Aufgabenstellung definiert wurde und welche Werkzeuge für einen erfolgreichen Import und Export der untersuchten Elemente nötig sind.

Es werden die Elemente Raum, Nutzung, Bauteile, Bauwerks-, Witterungs- und Bauteilschutz, Luft-, Tritt- und Anlagenschallschutz, Raumakustik und Brandschutz untersucht.

Diese Elemente werden in die verschiedenen Leistungsphasen von Grundlagenermittlung bis zur Bauausführung eingeteilt. In den jeweiligen Leistungsphasen wird auch definiert, welche Aufgaben hinsichtlich der bauphysikalischen Fachplanungen gefordert sind. Je nach Leistungsphase und Aufgabenstellung erfordert es unterschiedliche Outputs und damit verschiedene Werkzeuge, um diese zu erreichen.

Für die Untersuchungen sind unterschiedliche Import-Dateien notwendig. Diese können hinsichtlich der Herkunft und der Verfügbarkeit unterschieden werden. Die Herkunft wird wie folgt unterschieden:

- gebäudespezifische Informationen
- normative oder rechtliche Vorgaben
- produktspezifische Informationen

Die Verfügbarkeit der Daten wird unterschieden in direkt, indirekt und nicht vorhanden.

Gebäudespezifische Informationen können normalerweise aus dem BIM-Modell entnommen werden, sind diese noch nicht vorhanden, können sie angenommen werden. Der Prozess kann am Besten mit der folgenden Abbildung 1 dargestellt werden. Es wird dabei der Prozess zur U-Wert Festlegung abgebildet.



Abbildung 1: Prozess zur U-Wert Festlegung

Für den Datelexport können die bauphysikalischen Untersuchungen hinsichtlich der Relevanz für den weiteren BIM-Planungsprozess in folgende Punkte eingeteilt werden:

- Nicht relevant für weitere Planung
- Relevant, nicht im BIM-Modell erforderlich
- Relevant, im BIM Modell erforderlich

Um einen besseren Überblick zu erhalten und alle gesammelten Informationen übersichtlich zusammenzufassen wurde im Zuge dieser Arbeit eine Abhängigkeitsmatrix erstellt. Die folgende Tabelle 2 zeigt die Bereiche Aufgabenstellung, Ergebnisse, Werkzeuge und die Verfügbarkeit eines 3D-Modells. Anschließend wird der Teil aus der Tabelle dargestellt, der die schalltechnische Planung beschreibt.

Tabelle 2: Abhängigkeitsmatrix - Aufgaben, Ergebnisse, Werkzeuge

	LPH 1 Grundlagen- ermittlung	LPH 2 Vorentwurf	LPH 3 Entwurfs- planung	LPH 4 Einreichplanung	LPH 5 Ausführungspla- nung	LPH 7 Bauausführung
Aufgabe	Grundlagenfestlegung, Vorgaben und Planungsleistungen	Vordimensionierung, wesentliche Kennwerte, Gesamtkonzept erstellen	Bemessung der Bauteile, Variantenuntersuchung	behördliche Nachweise, Zertifizierungsprozesse	detaillierte Bauteilnachweise, Änderungen von Planungsergebnissen,	Qualitätsüberprüfung, technischen Lösungen während des Bauens
Erforderliche Ergebnisse	Lebensdauer des Gebäudes festlegen	Ausrichtung, Kubaturen, Fensterflächen, vereinfachtes HKLS-Konzept	Bauteilaufbauten, Fensterdaten, Auslegung HKLS	Energieausweis, Nachweise	detaillierte Nachweise, Simulationen	Qualitätsüberprüfung, detaillierte Planung von Ausführungsdetails
Werkzeuge	einfache Software-Tools	Normen	Energieausweis (begleitend), Festlegen der Anforderungen	generell Nachweise, Schall-, Feuchte- und Brandschutz	Simulation: Wärmebrücken, Bauteile, Raumakustik	Qualitätsprüfungen
BIM - Modell	nein	eventuell	ja	ja	ja	ja

Untersuchung Schallschutz

Luftschallschutz	<i>Import</i>		Nutzung, Geometrie, Außenlärmpegel (Standort)	Detaillierte Bauteilaufbauten			
	<i>Export</i>		Allgemeine Anforderungen an Außenbauteile, Ermittlung des Außenlärmpegels	Festlegung des Luftschallschutzes der Außenbauteile, Festlegung Luftschallschutz innerhalb vom Gebäude	Nachweis des Schallschutzes von Außenbauteilen, Fensterschalldämmwerte nach Ausrichtung festlegen	detaillierte Aufschlüsselung Schalldämm-Maßen der einzelnen Fenster/Türen, Außenbauteile, Innenwände	Bei Rohbaufertigstellung: Überprüfung des Luftschallschutzes mittels einer Prüfung,
Trittschallschutz	<i>Import</i>		Nutzungsarten, evtl. Anforderung an erhöhten Schallschutz	Anschlüsse detaillierte Bauteilaufbauten			
	<i>Export</i>		Allgemeine Anforderungen an den Trittschallschutz	Festlegung der Anforderungen des Trittschallschutzes	Nachweis des Trittschallschutzes, schalltechnische Entkoppelung beschreiben	detaillierte Planung von Bauteilanschlüssen	Bei Rohbaufertigstellung: Überprüfung des Trittschallschutzes mit einer Messung
Anlagenschallschutz	<i>Import</i>	evtl. Anforderung an erhöhten Schallschutz	Angaben zu Lüftung, Lift, Haustechnik etc.				
	<i>Export</i>	Allgemeine Anforderungen an Lüftung, Heizung, Warmwasser, Abwasser und Lift	Festlegung der Anforderungen an Lüftung, Heizung, Warmwasser, Abwasser und Lift	Beschreibung der Ausführung (hinsichtlich des Schallschutzes)	detaillierte Beschreibung der Ausführung (hinsichtlich des Schallschutzes)		

Einbindung mittels BCF-Datei

Oftmals entstehen zwischen zwei unterschiedlichen Programmen bzgl. des Exports und Imports Probleme hinsichtlich der Darstellung und eine fehlerhafter Informationsübergabe. Die Korrektheit einer IFC-Datei kann entweder händisch (mit sehr viel Aufwand verbunden) oder durch eine Modellprüfung sichergestellt werden. Bekannte Anwendungen sind unter anderem Solibri Model Checker, Tekla BIM Sight und Autodesk Navisworks. Zur Abwicklung dieser Modellprüfungen kann das BIM Collaboration Format (BCF) verwendet werden. (Esser, 2018)

Der Einbindeprozess wird mit einer IFC-Datei aus dem Softwareprogramm ArchiCAD durchgeführt. Das Modell ist ein Mehrfamilienhaus in massiver Bauweise. Für die Modellüberprüfung wird das Programm Solibri Model Checker verwendet. Anschließend werden die BCF-Dateien exportiert und in das Programm ArchiCAD 23 durch den BCF-Manager von BIM-Collab zum Bearbeiten importiert.

Modellprüfung mit Solibri Model Checker

Das Modell wird auf eventuelle Kollisionen überprüft und diese werden von geringem bis zum kritischen Schweregrad eingeteilt. Die auftretenden Kollisionen werden in einer Übersicht dargestellt und können mit den Eingaben vervollständigt werden. Es kann ebenfalls zur Erstellung einer neuen Aufgabe oder zur Darstellung eines aufgezeigten Problems verwendet werden. Der Vorteil des Solibri Model Checker ist, dass sich bestimmte Problemetails oder Aufgaben in einer Präsentation zusammenfassen lassen und diese dann in Form einer BCF, PDF oder Excel-Liste ausgegeben werden können. Die Abbildung 2 zeigt die Übersicht und Eingabemöglichkeiten der BCF-Datei im Solibri Model Checker-

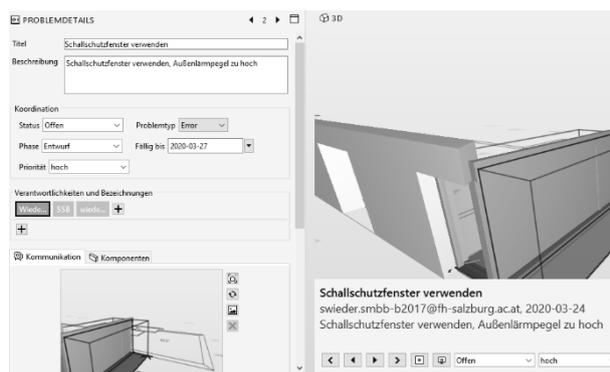


Abbildung 2: Übersicht der BCF-Datei in Solibri Model Checker

Import der BCF-Dateien

Zum Importieren in ArchiCAD 23 wird der BCF-Manager von BIMCollab verwendet. Nach dem Import der jeweiligen „*bcf.zip“-Datei werden im BCF-Manager die zu behandelnden Punkte angezeigt. Dort können diese auch gleich bearbeitet bzw. gelöst werden. Der Status kann aktualisiert und ein

Kommentar hinterlassen werden. Anschließend kann die überarbeitete BCF-Datei auf eine Online-Plattform geladen oder dem zuständigen Planer übermittelt werden, so wird ein ständig aktueller Planungsstand für alle Beteiligten angestrebt.

Zur Überprüfung des Vorganges wurden die IFC-Datei und die zugehörige BCF-Datei in das Softwareprogramm „Autodesk Revit 2020“ importiert. Ebenfalls wurde dies über das Add-on von BIMcollab abgewickelt. Die Anmerkung hinsichtlich des Schallschutzes wurde in diesem Programm ohne fehlende Informationen dargestellt, so wie es aus dem Softwareprogramm Solibri Office exportiert wurde.

DISKUSSION

Nach der Untersuchung und den daraus erlangten Erkenntnissen folgt in diesem Kapitel eine Diskussion zu den eventuell auftretenden kritischen Punkten.

Korrektheit des Gebäudemodells

Für eine umfassende bauphysikalische Untersuchung wird eine ausreichende Genauigkeit des importierten Gebäudemodells gefordert. Oft wird in der Ausschreibung nicht genau definiert, ob ein BIM-Planungsprozess angewendet wird. Es müssen genaue Definitionen hinsichtlich der Planungsgenauigkeit bestimmt werden. Auch beim Festlegen der einzelnen Objekte und Teilmodelle gibt es genaue Anforderungen wie dies auszuführen ist. Hier steht die Model View Definition (MVD) von buildingSMART zur Verfügung.

Zugriffsrechte

Die fehlenden Zugriffsrechte auf das Gebäudemodell selbst sind oft ein großes Problem in der Bauphysik. Der Ersteller erteilt jedem Projektbeteiligten bestimmte Rechte wie auf das Modell zugegriffen werden darf, ob Änderungen durchgeführt werden können oder nur eine Berechtigung für die Darstellung des Objektes ausgegeben wurde. Ein Fachplaner der Bauphysik hat meist nur das Recht zur Darstellung bzw. es steht eine IFC-Datei zur Verfügung, um die eigenen Berechnungen durchführen zu können. Jedoch werden selten direkte Änderungen an dem Gebäudemodell selbst vom bauphysikalischen Planer akzeptiert. Hier beweist sich das untersuchte BCF-Format, es können Anforderungen und Fehlerquellen gekennzeichnet und an den Planer zurückgegeben werden.

Fehlende Schnittstellen der Softwareprogramme

Die Anzahl der Softwareprogramme im Bereich Schall-, Feuchte- und Brandschutz ist groß, jedoch können nur die wenigsten die Berechnungen durch unabhängige Schnittstellen zur Weiterbearbeitung übermitteln. Großteils werden Nachweise erbracht oder die berechneten Ergebnisse werden zwar als 3D-Modell dargestellt, können aber in kein anderes Programm eingepflegt werden. Hier bedarf es

intensivere Kommunikation zwischen den Softwareherstellern.

Relevanz für den Planungsprozess

Im Fachbereich der Bauphysik werden vor allem Nachweise als Output-Dateien erbracht, die jedoch für den weiten BIM-Prozess und das BIM-Modell selbst nicht relevant sind. Sie dienen lediglich als Nachweis für die bauphysikalischen Untersuchungen. Auf der anderen Seite gibt es auch Export-Dateien, die für den weiteren Verlauf wichtig sind und auch in das Modell eingepflegt werden sollen. Eine direkte Änderung der Bauteile bzw. des Modells ist meist nicht möglich und darum kann in diesen Fällen auch auf das BCF-Format zurückgegriffen werden. Die relevanten Anforderungen können so im Modell hinterlegt werden und die Projektbeteiligten haben evtl. durch eine Cloud-Plattform auch Zugriff auf diese Datei. Somit werden wichtige Informationen mit allen kommuniziert.

Das BCF-Format

Oftmals treten Probleme beim Verwenden von verschiedenen Softwareprogrammen hinsichtlich der Darstellung auf. Die festgelegten Perspektiven in dem Export-Programm werden oft in dem Import-Programm nicht an der richtigen Stelle dargestellt. Dies hängt oft mit der Befüllung der einzelnen Elemente zusammen, was von Programm zu Programm unterschiedlich ist.

Hier kann die Variante mit einem eigenständigen Vermittlungsprogramm wie zum Beispiel BIMCollab angewendet werden. Dort werden die BCF-Dateien verwaltet, die Plugin-Lösungen sind auch für viele Softwareprogramme erhältlich. Somit werden die BCF-Dateien über die gleiche Hintergrundstruktur verwaltet.

CONCLUSIO

Diese Arbeit soll die Möglichkeiten zur Einbindung von bauphysikalischen Untersuchungen in den BIM-Planungsprozess darstellen. Zum aktuellen Zeitpunkt findet der Fachbereich der Bauphysik nur eine sehr geringe Anwendung im BIM-Planungsprozess. Einer dieser Gründe sind die fehlenden Schnittstellen der Softwareprogramme, die für die Untersuchungen nötig sind. Der Bereich der thermischen Gebäudesimulation ist bereits weitgehend untersucht und die entsprechenden Softwareprogramme werden teilweise auch im aktuellen BIM-Planungsprozessen verwendet. Die Fachbereiche Schall-, Feuchte- und Brandschutz werden hingegen nur sehr selten in das BIM-Modell eingebunden, dies spiegelt sich auch in den zur Verfügung stehenden Softwareprogrammen wieder. Das Problem der fehlenden Einbindung ist hier auch die Relevanz für das BIM-Modell, da es sich bei bauphysikalischen Untersuchungen meist um Nachweise oder Zertifizierungen handelt und diese keinen direkten Einfluss auf den weiteren Verlauf haben. Trotzdem wird versucht relevante Informationen in diesen Bereichen in das Modell

einzubinden und hier hat sich das BCF-Format bewährt. Festzuhalten ist hier, dass ein korrektes Gebäudemodell für eine optimale Anwendung vorausgesetzt wird und die Übergabeformate, der Detaillierungsgrad und der Zeitpunkt der Übermittlung der bauphysikalischen Untersuchungen zu Beginn des Projektes definiert werden. Somit kann ein reibungsloser Ablauf vorausgesetzt werden.

LITERATUR

- BIMCollab (2020): BIMCollab. Hg. v. KUBUS.
- Borrmann, André; König, Markus; Koch, Christian; Beetz, Jakob (2015): *Building Information Modeling*. DOI: 10.1007/978-3-658-05606-3.
- Chen, S., Jin, R., Alam, M. (2018). Investigation of interoperability between building information modelling (BIM) and building energy simulation (BES). *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 9(2)
- Esser, Sebastian (2018): Kommunikation in BIM-Projekten auf Grundlage von *.bcf-Daten. Hg. v. Lehrstuhl für computergestützte Modellierung und Simulation. Technische Universität München. München.
- Ivanova, I., Kiesel, K., Mahdavi, A. (2015). BIM-generated data models for EnergyPlus: a comparison of gbXML and IFC Formats. *Proceedings of Building Simulation Applications, BSA*.
- Jeong, WoonSeong; Kim, Jong Bum; Clayton, Mark J.; Haberl, Jeff S.; Yan, Wei (2014): Translating building information modeling to building energy modeling using model view definition. Hg. v. *The Scientific World Journal*.
- Maskil-Leitan, Reuven; Reychav, Iris (2018): BIM's social role in building energy modeling. Hg. v. Springer Verlag GmbH (2).
- Niedermaier, Anke; Bäck, Robert (2018): Allplan BIM-Kompendium Theorie und Praxis. basierend auf dem offiziellen Release IFC4. 4. Hg. v. ALLPLAN GmbH. ALLPLAN GmbH.
- Oduyemi, Olufolahan; Okoroh, Michael (2016): Building performance modelling for sustainable building design. Hg. v. *International Journal of Sustainable Built Environment* (2).
- Schatz Kristian (2020): Baunetz_Wissen_. Hg. v. ComputerWorks GmbH. Bensheim. Online verfügbar unter <https://www.baunetzwissen.de/bim/fachwissen/standardisierung/modellbasierter-nachrichtenaustausch-mit-bcf-5288163>.
- Zanotto, V. (2016). Case Study Bauphysik. Welche Modelle erzeugen welchen Nutzen? On-line im Internet: www.sia.ch/fileadmin/content/download/berufsruppen/bgt/BGT_Jah-restagung_2016/003_Valentina_Zanotto_Bauphysik.pdf [Stand: 18.12.2018]

ENTWICKLUNG EINER VIRTUAL REALITY-UMGEBUNG ZUR INTERAKTIVEN THERMISCHEN RAUMSIMULATION

C. Nytsch-Geusen¹ und K. Mathur¹

¹Institut für Architektur und Städtebau, UdK Berlin, Berlin, Deutschland

Email: nytsch@udk-berlin.de

KURZFASSUNG

Im vorliegenden Beitrag wird ein Ansatz beschrieben, bei dem der Modellierungs- und Simulationsprozess für das Innenraumklima von Gebäuden vollständig in einer Virtual Reality (VR)-Umgebung stattfindet. Auf diese Weise wird der Simulationsexperte bezüglich des Raumdesigns, der räumlichen Wahrnehmung und der Interaktion mit dem Raummodell immersiv eingebunden. Das durch die Interaktionen sich ergebende simulierte Innenraumklima und weitere Größen wie z.B. Energiebedarfe werden dem Nutzer in der VR-Umgebung als Feedback visualisiert.

Zur softwaretechnischen Realisierung des beschriebenen Ansatzes wurde das Modelica-Werkzeug Dymola mit der Spiele-Engine Unity zu einem Gesamtsystem integriert, wobei zwischen beiden Programmen ein bidirektionaler Datenaustausch erfolgt. Die Basis der Berechnungen in Dymola bilden hierbei das thermische Gebäudemodell der Modelica-Bibliothek BuildingSystems. In Unity wurde zur Realisierung der VR-Simulationsumgebung ein Head-Mounted Display eingebunden und die zwei Modi „Modelling“ und „Simulation“ prototypisch implementiert und in einem Simulationsszenario evaluiert.

ABSTRACT

This article describes an approach in which the modeling and simulation process for the indoor climate of buildings takes place entirely in a virtual reality (VR) environment. In this way, the simulation expert is immersively involved with regard to the spatial design, spatial perception and interaction with the spatial model. The simulated indoor climate resulting from the interactions and other variables such as Energy requirements are visualized in the VR environment as a feedback to the user.

To implement the described approach in terms of software, the Modelica tool Dymola was integrated with the game engine Unity to form a complete system, with bidirectional data exchange taking place between the two programs. The building model of the Modelica library BuildingSystems forms the basis of the building physics calculations in Dymola. In Unity, a head-mounted display was integrated to implement the VR simulation environment, and the two modes "modeling" and "simulation" were prototypically implemented and evaluated in a simulation scenario.

EINLEITUNG

Werkzeuge zur energetischen Gebäude- und thermischen Raumsimulation ermöglichen detaillierte Prognosen des Innenraumklimas und des Gebäudeenergiebedarfs. Je nach Simulationstool oder Workflow stehen dem Anwender hierfür unterschiedliche Werkzeuge zur Modellbildung (Definition von Gebäudegeometrie und -topologie, der Baukonstruktion sowie der Abbildung des Nutzerverhaltens) und zur Durchführung und Auswertung der Simulationsanalyse zur Verfügung.

Bei diesem Vorgehen findet sowohl die Erzeugung als auch die thermisch-energetische Analyse des Gebäudemodells innerhalb eines Workflows statt, bei dem der Simulationsexperte nicht immersiv bzgl. seiner Aktionen und seiner Wahrnehmung in die Simulationsumgebung integriert ist. Der Nutzer hat eine körperliche Distanz zum Modellierungsprozess und zum Simulationsexperiment, in dem er dem Simulationswerkzeug über ein Keyboard seine Aktionen mitteilt und über den Bildschirm den Fortschritt des Modellierungsprozesses und die Ergebnisse des Simulationsergebnisses wahrnimmt.

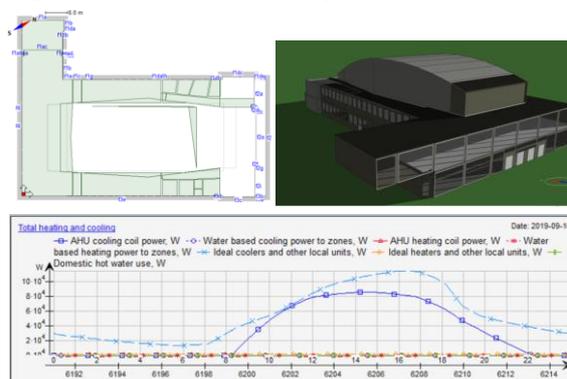


Abbildung 1: Klassische Modellierung und energetische Simulationsanalyse von Gebäuden mit IDA ICE als Desktop-Anwendung

Abbildung 1 zeigt am Beispiel des Konzertsaals der UdK Berlin diese heute übliche Vorgehensweise beim Modellierungs- und Simulationsprozess am Beispiel des Simulationswerkzeuges IDA ICE (IDA ICE, 2020). Der Simulationsexperte modelliert zunächst mit der Desktop-Anwendung die Geometrie des Gebäudes unter Berücksichtigung seiner Zonierung (oder importiert es alternativ als BIM-Modell) und

legt danach die bauphysikalischen Eigenschaften der Baukonstruktion sowie die Raumnutzungen fest. Im nächsten Schritt erfolgt für den gegebenen Klimastandort die Simulationsanalyse, woraufhin die Ergebnisse auf dem Bildschirm als Zeitreihen oder visualisiert im 3D-Gebäudemodell dargestellt werden.

Der in diesem Beitrag vorgestellte methodische Ansatz will diese Arbeitsweise grundlegend verändern, in dem er den Simulationsexperten sowohl beim Modellierungsprozess als auch bei der Durchführung des Simulationsexperimentes immersiv in eine VR-Simulationsumgebung einbettet. Der komplette Workflow ausgehend von der Formgebung des einzelnen Raumes über die Materialdefinition der Baukonstruktion bis hin zur Durchführung und Auswertung des Simulationsexperiments findet nun im virtuellen Raum statt, in welchem dem Nutzer die hierfür notwendigen Werkzeuge zur Verfügung gestellt werden müssen.

Für den ersten Teil des beschriebenen Ansatzes wurden bereits erste Softwaretools entwickelt, welche eine direkte oder indirekte Modellierung von Architekturmodellen in VR-Umgebungen unterstützen.



Abbildung 2: Direktes Erstellen von Architekturmodellen in der Virtual Reality mit VR Sketch

Abbildung 2 zeigt das kommerzielle Sketchup-Plugin VR Sketch (VR Sketch, 2020), welches dem Nutzer ein Toolset an Modellierungswerkzeugen anbietet, das eine *direkte Modellierung* von 3D-Gebäudemodellen in einer VR-Umgebung ermöglicht. Schon während des Entstehungsprozesses kann das 3D-Modell virtuell begangen werden, wodurch eine interaktive Modellentwicklung unterstützt wird.

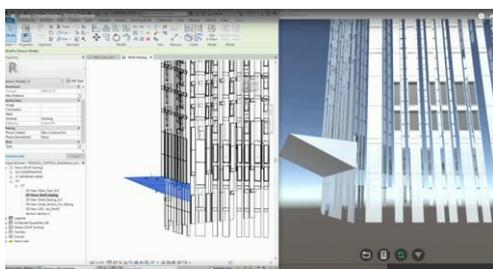


Abbildung 3: Indirektes Modellieren in einer VR-Umgebung in Revit über Unity Reflect

Das Werkzeug Unity Reflect (Unity, 2019) ist ein neues, ebenfalls kommerzielles Plugin für die Spiele-Engine Unity (Unity, 2020), welches den Realtime-Datenaustausch zwischen im Bauwesen genutzten

CAD-Programmen (bisher für Revit und SketchUp) und Unity unterstützt und damit ein *indirektes Modellieren in einer VR-Umgebung* erlaubt.

Wie in Abbildung 3 dargestellt, ermöglicht dies zukünftig ein kollaboratives Arbeiten in Entwurfsteams: ein Architekt nimmt geometrische Anpassungen an seinem BIM-Modell im CAD-Werkzeug vor (z.B. im Revit-Modell in Abbildung 3 links), welche unmittelbar in der auf Unity basierenden VR-Simulationsumgebung aktualisiert werden (siehe Abbildung 3 rechts). Ein Kollege kann dann die Modellveränderung in der virtuellen Realität im realen Maßstab unmittelbar erfahren und bewerten und daraufhin dem entwerfenden Architekten am Desktop-Rechner sein Feedback geben.

Beide VR-Umgebungen unterstützen bisher keine thermische und energetische Analyse von Innenräumen. Sie erlauben zudem dem Nutzer auch keine Interaktion mit dem Gebäudemodell, er ist also bisher ein passiver Betrachter von selbst geschaffenen architektonischen Räumen, deren Echtzeitvisualisierungen auf Basis der verwendeten modernen Hardware- und Softwaretechnologien aus der Gaming-Industrie eine hohe Qualität aufweisen.

Ein erster Forschungsansatz zum Computational Steering im Bereich der Innenraumklimasimulation demonstrierte die Realzeitkopplung eines parallelisierten echtzeitfähigen CFD-Rechenkerns mit einer interaktiven VR-Visualisierungsumgebung (Treec et al., 2006).

Der Prototyp einer ersten Realzeitkopplung zwischen einem thermischen Mehrzonen-Gebäudemodell auf Basis von Modelica/Dymola und einer VR-Simulationsumgebung auf Basis von Unity3D/HTC Vive wird in (Nytsch-Geusen et al., 2017b) beschrieben. Bei diesem Ansatz wurden zunächst das in einem CAD-Tool extern erstellte BIM-Modell nach Unity importiert, dort manuell um Möglichkeiten zur Nutzerinteraktion angereichert und danach durch manuelle Konfiguration bzgl. des Datenaustausches mit dem energetischen Gebäudemodell verbunden.

ANFORDERUNGEN AN DIE VR-SIMULATIONSUMGEBUNG

Ausgehend von dem beschriebenen Entwicklungsstand wurde von den Autoren zunächst die Anforderungen an eine VR-Umgebung zur thermischen Raumsimulation spezifiziert, um diese anschließend in ihren wesentlichen Grundzügen prototypisch zu implementieren. Die VR-Simulationsumgebung soll zwei voneinander getrennte Modi unterstützen, den *Modelling-Mode* und den *Simulation-Mode*.

Modelling-Mode

Im Modelling-Mode sollen die *Raumgeometrie* und die *bauphysikalischen Eigenschaften der Baukonstruktion* definiert werden können. Hierzu müssen dem Nutzer Werkzeuge zur Verfügung

gestellt werden, die eine einfache Definition von architektonischen Räumen innerhalb einer VR-Umgebung unterstützen (vgl. Abbildung 4).

Weiterhin soll die *Auswahl des lokalen Standorts* des zu analysierenden Gebäudes erfolgen können, was zum einen die Festlegung des Außenklimas bedeutet, prinzipiell aber auch die Berücksichtigung der Gebäudeumgebung und des Gebäudeuntergrunds (Nachbarbebauung und Topographie des Standorts) mit einschließen muss, um die Randbedingungen des Simulationsexperiments (z.B. Verschattung im urbanen Raum) realistisch abbilden zu können.



Abbildung 4: Definition der Raumgeometrie im Modelling-Mode innerhalb der prototypisch implementierten VR-Simulationsumgebung

Ein weitere notwendige Funktionalität des Modelling-Modes ist die *Festlegung der möglichen Interaktionen* im Raummodell während des Simulationsexperiments. Hierzu gehört das Ermöglichen des Öffnens von Türen und Fenstern, die Bereitstellung von Schaltern und Kontrollfunktionen für die Beleuchtung, die Klimatisierung von Räumen (Raumthermostat) und das Aktivieren des Sonnenschutzes von Fassaden.

Simulation-Mode

Nach der Definition des Gebäudemodells im Modelling-Mode soll in einfacher Weise in den Simulation-Mode gewechselt werden können, um in einer Realzeit-Simulation das sich einstellende Innenraumklima zu analysieren. Da thermische Prozesse wie die Erwärmung oder Abkühlung eines Raumes oder die Veränderung der täglichen Sonnenposition nur sehr langsam stattfinden, muss der Simulation-Mode auch eine zeitweise erhebliche *Beschleunigung der Realzeitsimulation* über einen Realzeitfaktor unterstützen. Auf diese Weise kann der Nutzer entweder in einer beschleunigten Simulation die physikalisch korrekt berechneten thermischen Prozesse passiv beobachten oder er kann in einer Realzeitsimulation aktiv das Simulationsmodell in seinen wesentlichen Parametern beeinflussen und so die Auswirkungen auf das Raumklima analysieren.

Hierzu soll der Simulationsexperte im Modelling-Mode mit den reaktiven Elementen des Raummodells interagieren können, wie z.B. durch das vollständige Öffnen oder Kippen eines Fensters oder das Aktivieren eines Sonnenschutzes vor einem Fenster.

Außerdem soll es möglich sein, während des Simulationsexperiments auch die *Raumgeometrie* und somit die Dimensionen und Ausrichtung der opaken und transparenten Baukonstruktionen *dynamisch anzupassen*. Hierdurch soll eine direkte interaktive Analyse des Innenraumklimas und der zugehörigen Energieeffizienz für geometrisch unterschiedliche Raumausprägungen ermöglicht werden.

Ein weitere Anforderung an den Simulations-Mode besteht in der *Visualisierung der berechneten raumklimatischen sowie energetischen Zustände des Raummodells*. Je nach Fragestellung des Simulationsexperiments und Detaillierungsgrad des genutzten Raummodells sollen die Raumlufttemperatur und Raumluftfeuchte, die Strahlungstemperaturen der einzelnen Bauteiloberflächen, die Außenlufttemperatur und Außenluftfeuchte des Standorts, aber auch energetische Größen wie die notwendige Heiz- oder Kühlleistung zur Aufrechterhaltung eines gewünschten Raumklimas als räumlich verteilte Momentanwerte oder Zeitreihen über den gesamte Simulationszeitraum dargestellt werden können.

Softwarearchitektur

Die Softwarearchitektur der interaktiven VR-Simulationsumgebung ist nach einem streng modularen Ansatz aufgebaut (vgl. Abbildung 5).

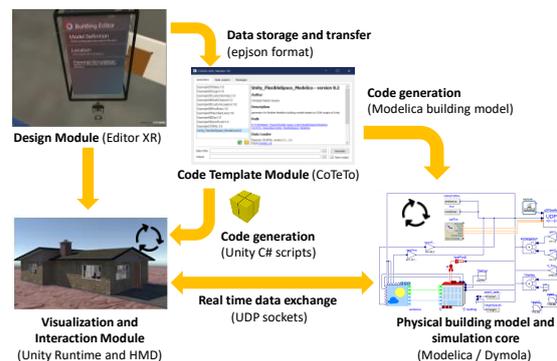


Abbildung 5: Softwarearchitektur der interaktiven VR-Simulationsumgebung

Das **Design Module** enthält die Modellierungstools, mit welchen im Modelling-Mode das 3D-Gebäudemodell in der VR-Umgebung erstellt werden kann, was die Festlegung seiner Geometrie und Topologie, seiner Baukonstruktionen, den lokalen Standort und möglicher Modell-Interaktionen einschließt.

Beim Wechsel vom Modelling- in den Simulation-Mode werden über einen Datelexport (**Data storage and transfer**) alle notwendigen Daten zur automatisierten Erzeugung des thermischen Gebäudemodells an das **Code Template Module** weitergeleitet. Dieses generiert zum einen das über das Design Module definierte thermische Modelica-Gebäudemodell (**Physical building model**), zum anderen die hierzu passenden Skriptdateien, welche Umfang und Struktur des bidirektionalen Datenaustausches zwischen dem thermischen Gebäudemodell und dem **Visualization and Interaction Module** zur Laufzeit konfigurieren.

Diese Modul ist ebenfalls eine VR-Umgebung, die alle Anforderungen des Simulation-Mode, wie Nutzerinteraktion sowie Anpassung des Realzeitfaktors und der Raumgeometrie unterstützt.

IMPLEMENTIERUNG

Die Implementierung der VR-Simulationsumgebung beruht zum einen auf der Game-Engine Unity (Unity, 2020). Unity verfügt über einen Szenen-Editor, in dem komplexe 3D-Szenen über Szenengraphen definiert werden können und über einen Play-Mode, in welchem ein Nutzer auf Grundlage der vorab definierten Szenen sich in 3D-Räumen bewegen und mit den Objekten der Szene (GameObjects) interagieren kann. Die in Unity enthaltenen Mechanismen können über C#-Skripte erweitert werden, um die Logik innerhalb der Szenen im Play-Mode zu erweitern. Weiterhin unterstützt Unity die Integration von VR/AR-Geräten wie z.B. des Head Mounted Display HTC Vive oder die Augmented Reality Brille Microsoft Hololens.

Die strukturelle Aufteilung von Unity in den Szenen-Editor und den Play-Mode wurde genutzt, um den Modelling- und Simulation-Mode in Unity umzusetzen. Durch Nutzung von Unity Ergänzungsmodulen und C#-Skriptprogrammierung wurde der Szenen-Editor zum Modelling-Mode erweitert und in den Play-Mode die gewünschten Funktionen des Modelling-Modus implementiert.

Die Modellierung des physikalischen Gebäude-modells inkl. der bidirektionalen Datenkommunikation zu Unity über das UDP-Datenprotokoll erfolgt über die Modelica-Bibliotheken BuildingSystems (Nytsch-Geusen et al., 2016) und Modelica_DeviceDrivers (Thiele et al., 2017) in Kombination mit dem Simulationswerkzeug Dymola. Das Modelica-Gebäudemodell wird in Abhängigkeit der im Design Module vorgenommenen Modellierung automatisch über das CoTeTo-Werkzeug zur Codegenerierung (Nytsch et al., 2017a) erzeugt.

Design Module

Die Implementierung des Design Module wurde auf Grundlage der Unity-Erweiterung Editor XR (Editor XR, 2020) vorgenommen, welche den Editier-Mode von Unity so erweitert, das alle Modellierungsfunktionen von Unity (z.B. Erstellen von Szenen, Instanzieren und Manipulation von Szenenobjekten bzgl. ihrer Größe, Position, Form und visueller Darstellung) innerhalb einer VR-Umgebung durchgeführt werden können. Weiterhin bietet die Editor-XR-Toolbox vordefinierte Werkzeuge, wie z.B. 3D-Menüs oder eine 3D-Workbench, welche an die Anforderungen der Implementierung eines Unity-Projekts flexibel angepasst werden können.

Auf dieser Grundlage wurden über C#-Skripte das Nutzer-Interface und die Modellierungswerkzeuge zur Gebäudeerstellung für das Design Module implementiert (vgl. Abbildungen 6 und 7).

Abbildung 6 oben links zeigt das Nutzerinterface mit den drei Hauptmenüpunkten

- Modelldefinition (Model Definition),
- Wahl des Simulationsstandorts (Location) und
- Wechsel in den Simulation-Mode (Thermal Simulation)

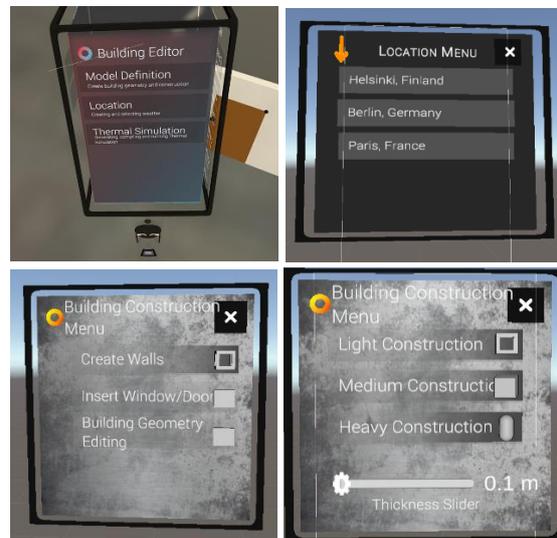


Abbildung 6: Nutzerinterface des Design Module

Die anderen gezeigten Menübeispiele ermöglichen die Wahl eines geografischen Standorts, die Auswahl eines Werkzeugs zur Raummodellierung (Wände, Fenster, Türen) bzw. die individuelle Festlegung der thermischen Kapazitäten der einzelnen opaken Gebäudeelemente über die Bauteildicke.

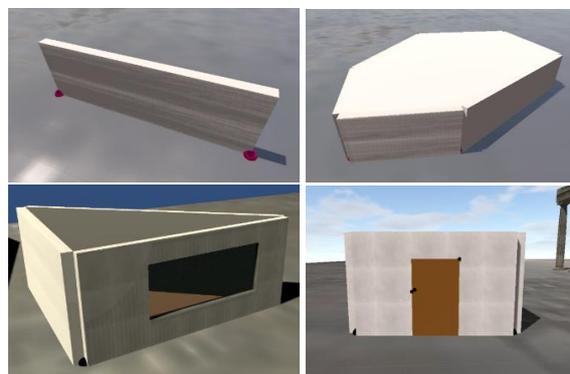


Abbildung 7: Erstellen von Raumgeometrien und Gebäudeelementen im Design Module

Nach Auswahl des Wand-Editierwerkzeugs kann mit Hilfe der Controller des genutzten Head-Mounted-Displays HTC Vive über die Markierung eines Polygonzuges auf dem in der virtuellen Welt sichtbaren Boden die Länge und Ausrichtung der einzelnen Wände eines Raum definiert werden, wobei die Wände hierbei eine unterschiedliche Dicke aufweisen können. Die Bodenplatte und die Decke werden nach Schliessen des Polygonzuges automatisch ergänzt (vgl. Abbildung 4 sowie Abbildung 7 oben links und rechts).

Anschließend können in die einzelnen Wände Fenster und Türen eingefügt werden, die jede für sich ein für den Nutzer interaktives Gebäudeelement im Simulation-Mode darstellen können (Tür öffnen bzw. Fenster öffnen durch Drehen oder Kippen).

Datentransfer von Unity nach CoTeTo

Nach Definition eines Gebäudemodells im Design Module werden die das Gebäudemodell beschreibenden Geometrie-, Material-, und Standortdaten im JSON-Format gespeichert und exportiert. Hierbei wird auf das spezielle epJSON-Format des international weit verbreiteten Gebäudesimulationsprogramm EnergyPlus (Adams, 2018) aufgebaut, welches seit der Version 8.8 experimentell und seit der Version 9.0 standardmäßig als Eingabeformat dient.

Die Verwendung dieses „Quasistandards“ hat den Vorteil, dass auch ein für EnergyPlus erstelltes Gebäudemodell in den Workflow der VR-Simulationsumgebung nach CoTeTo importiert und zur Erzeugung eines Modelica-Gebäudemodells genutzt werden kann. Beim Datenexport aus dem Design Module wurde das epJSON-Format in seiner Struktur um einen Abschnitt erweitert, welcher ergänzende topologische Informationen zu den Bauelementen des Einzelraumes beschreibt.

Code Template Module

Im Design Module wird durch Betätigen des Menü-Eintrages „Generate Model“ das erweiterte JSON-File im EnergyPlus-Format erzeugt, von CoTeTo eingelesen und daraufhin das Modelica-Gebäudemodell generiert. Dieses kann über die Menüeinträge „Compile Model“ und „Run Model“ zunächst in ein ausführbares Modelica-Modell übersetzt und anschließend das Simulationsexperiment gestartet werden (vgl. siehe Abbildung 8).

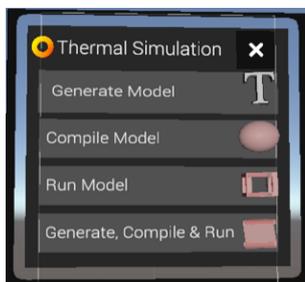


Abbildung 8: Menü zum Generieren, Kompilieren und Starten des Modelica-Gebäudemodells

Alternativ können auch alle drei Schritte über den Menüeintrag „Generate, Compile & Run“ ausgeführt werden, wobei die VR-Umgebung dann automatisch in den Simulation-Mode wechselt.

Softwaretechnisch geschieht dies durch das Aufrufen eines Python-Skripts, welche alle Einzelschritte des Workflows über entsprechende Python-Schnittstellen von CoTeTo und Dymola ansteuert (vgl. Codeausschnitt in Abbildung 9). Das Python-CoTeTo-Modul erzeugt dabei nicht nur über ein Modelica-Template das Gebäudemodell, sondern

auch über C#-Templates zwei C#-Skripte. Mit diesen Skripten wird in Abhängigkeit vom Simulationsszenario festgelegt, welche Variablenwerte vom Modelica-Modell an die 3D-Szene im Simulation-Mode in Unity gesendet werden (Datum, Uhrzeit, Längen- und Breitengrad sowie Wetterdaten des gewählten Standorts, Oberflächen- und Raumlufttemperaturen des Gebäudemodells, Umgebungslufttemperaturen etc.) und welche Werte aus der 3D-Unity-Szene zurück an das Modelica-Modell übermittelt werden sollen (Nutzerinteraktionen wie das Öffnen von Türen, und Fenstern oder das Verändern der Raumgeometrie etc.).

```
# Model generation based on CoTeTo
from CoTeTo.Controller import Controller
con = Controller()
gen = con.generators['Unity_FlexibleSpace_Modelica::0.2']
gen.execute(,buildingData.epJSON', './FlexibleSpace')

# Real-time simulation experiment with Dymola
from dymola.dymola_interface import DymolaInterface
dym = DymolaInterface()
dym.openModel('BuildingSystems/package.mo')
dym.openModel('FlexibleSpace/package.mo')
dym.openModel('Modelica_DeviceDrivers/package.mo')
dym.translateModel('FlexibleSpace')
dym.simulateModel(problem='FlexibleSpace', ...)
```

Abbildung 9: Python-Skript zur Steuerung des Workflows (Erzeugung und Übersetzung des Modelica-Modells, Starten der Realzeit-Simulation)

Physical building model

Für die Anforderung einer flexiblen Raumgeometrie zur Laufzeit wurden das Zonenmodell sowie die Wand-, Tür- und Fenstermodelle der BuildingSystems-Bibliothek um die optionale Möglichkeit einer flexiblen Bauteilgeometrie und Orientierung erweitert. Abbildung 10 demonstriert wie in Abhängigkeit des Werts des Flags `geometryType` das Zonen- und Wandmodell eine starre oder flexible Geometrie aufweisen kann.

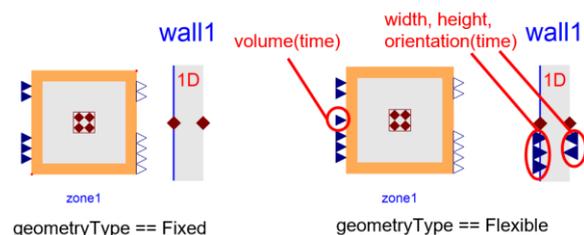


Abbildung 10: Zonen- und Wand-Modell der Modelica BuildingSystems-Bibliothek für starre (links) und flexible (rechts) Raumgeometrien

Ist das Flag auf den Wert `Flexible` gesetzt, können die zusätzlich zur Verfügung gestellten Modellinputs für das Raumluftvolumen des Zonenmodells sowie die Höhe, Breite, der Azimut- und Neigungswinkel der Wand-, Tür- und Fenstermodelle mit anderen dynamischen Werten belegt werden. Diese können z.B. über den Datenaustausch aus dem parallel

laufenden Unity-Szenenmodell stammen, im welchem der Nutzer im Simulation-Mode das thermische Raummodell fortlaufend geometrisch adaptieren kann. In diesem Fall werden in den betroffenen Modelica-Modellen die Zonen- und Bauteilgeometrien nicht über Parameter, sondern über zeitabhängige Gleichungen bestimmt.

In Abbildung 11 ist das generierte Modelica-Systemmodell dargestellt. Es enthält zunächst das thermische Raummodell, welches auf den flexiblen Zonen- und Bauelementmodellen aufbaut. Weiterhin beinhaltet es die Modellkomponente zum bidirektionalen Datenaustausch über das UDP-Protokoll. Bei Modifikation der Raumgeometrie zur Laufzeit des Simulationsexperiments können dem Raummodell zeitabhängige Werte für die Koordinaten des über das Polygon definierten Grundriss des Raumes und die Raumhöhe als Input-Werte vorgegeben werden.

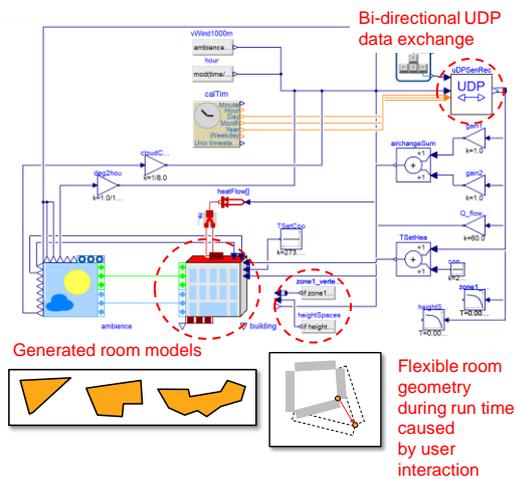


Abbildung 11: Modelica-Systemmodell mit flexibler Raumgeometrie für eine Realzeitsimulation mit Unity

Visualization and Interaction Module

Dieses Modul wurde als Erweiterung des Play-Modus von Unity ebenfalls in C# implementiert.

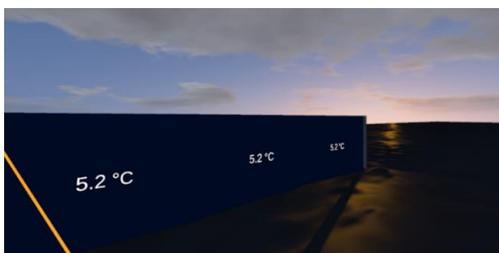


Abbildung 12: Visualisierung der Bauteiloberflächentemperaturen im Simulation-Mode

Die Visualisierung der Simulationsergebnisse wurde in zwei Weisen implementiert. Zum einen werden Simulationsergebnisse als Farbwerte und numerische Werte auf den Bauteilen direkt angezeigt. Zum anderen können aber auch wichtige dynamische Modellvariablen als Zeitreihen in der VR-Umgebung dargestellt werden (vgl. Abbildungen 12 und 13).

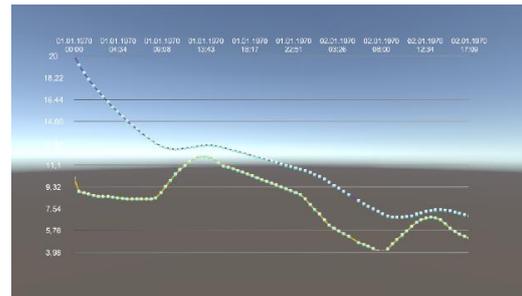


Abbildung 13: Visualisierung von Zeitreihen in der VR-Umgebung (hier Außenlufttemperatur und Raumlufttemperatur) im Simulation-Mode

Weiterhin wurden im Play-Mode die Interaktionsmöglichkeiten zum Öffnen der reaktiven Raumelemente implementiert, welche über die Controller der HTC Vive ausgelöst werden können.

ANWENDUNGSBEISPIEL

Mit dem Anwendungsbeispiel sollen die beschriebenen Eigenschaften und Funktionen der VR-Simulationsumgebung demonstriert werden.

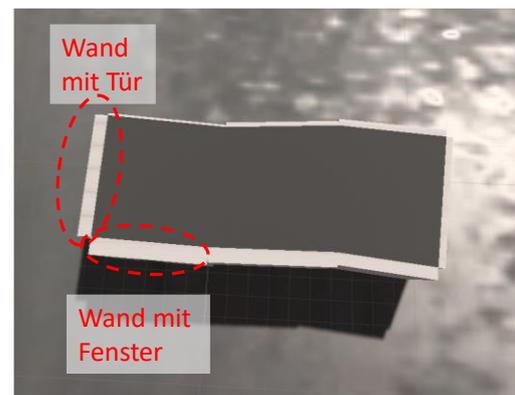


Abbildung 14: Raummodell mit 6 Außenwänden und starrer Raumgeometrie

Im Modelling-Mode wurde zunächst der Standort Berlin ausgewählt und danach ein Raum mit 8 Außenwänden unterschiedlicher Dicke über das Polygonzug-Werkzeug und das Konstruktionsmenü festgelegt. Anschließend wurde in eine Wand ein Fenster und eine andere eine Tür eingefügt (vgl. Abbildung 14), welche als interaktive Elemente zur Simulationslaufzeit geöffnet werden können. Ausgehend von diesem Raummodell wurden zwei Anwendungsfälle untersucht:

1. Starre Raumgeometrie, Interaktion mit der Tür und dem Fenster während des Simulationsexperiments, ausgeschaltete Heizung (frei schwingende Raumlufttemperatur)
2. Flexible Raumgeometrie durch Veränderung des Grundrisses während des Simulationsexperiments, eingeschaltete Heizung (Sollwert der Raumlufttemperatur 20 °C)

Die beiden Simulationsszenarien wurden für zwei Tage Realzeit an einem kalten Wintertag am ersten Tag des Jahres durchgeführt, wobei zu einer rascheren

Durchführung der Simulationsexperimente der Realzeitfaktor um ein vielfaches vergrößert wurde. Alle Bauteiltemperaturen und die Raumlufttemperatur sind mit einer Temperatur von 20 °C initialisiert.

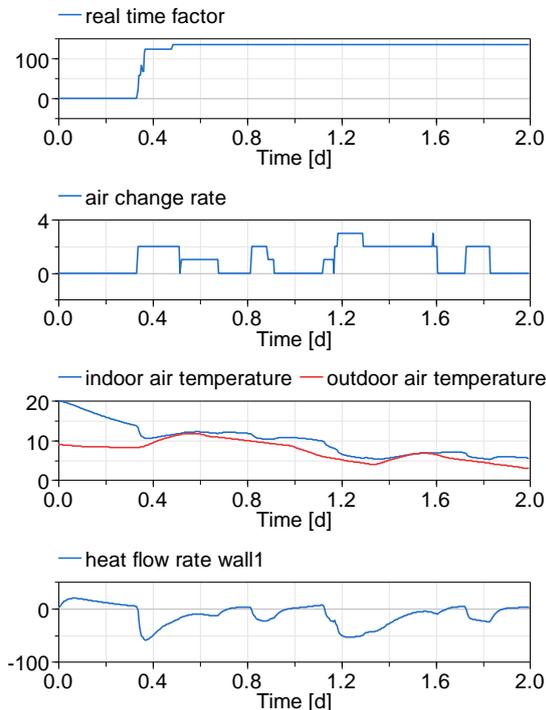


Abbildung 15: Einfluss des Nutzerverhaltens auf das Innenraumklima

Der in Abbildung 15 dargestellte erste Anwendungsfall zeigt deutlich den Einfluss des Nutzerverhaltens durch das Öffnen der Tür bzw. Öffnen oder Kippen des Fensters. Immer wenn ein erhöhter Luftwechsel durch das Nutzerverhalten verursacht wird, nähert sich die Raumlufttemperatur der kalten winterlichen Außenlufttemperatur stärker an und der Wärmestrom von der noch gegenüber der Raumluft wärmeren Baukonstruktion in den Innenraum erhöht sich zeitweise (exemplarisch für eine Wand dargestellt). Die Luftwechselsimulation ist in diesem Experiment noch physikalisch vereinfacht abgebildet: Eine geöffnete Tür führt im Modell zu einem Luftwechsel von 1/h, ebenfalls ein gekipptes Fenster, ein über den Drehflügel geöffnetes Fenster zu einem Luftwechsel von 2/h. Falls die Tür und das Fenster gleichzeitig geöffnet sind, werden beide Luftwechsel addiert.

Im zweiten Anwendungsfall wird ausgehend vom gleichen Raummodell der Grundriss während des Simulationsexperiments vom Nutzer dreimal verändert, wobei sich das Raumluftvolumen zunächst zweimal deutlich vergrößert und danach wieder etwas verringert wird (exemplarisch ist auch von der Wand wall12 die Fläche dargestellt, die sich wegen der Grundrissänderung ebenfalls ändert, vgl. Abbildungen 16 und 17)¹⁷. Der Wert der Raumlufttemperatur beträgt entsprechend der Sollwert-Vorgabe konstant 20 °C, entsprechend zeigt die benötigte Heizlast einen

¹⁷ Sowohl der Wert des Raumluftvolumens als auch der Wandfläche von wall2 weisen im Fall der flexiblen Geometrie für einen

sprunghaften Anstieg bzw. eine Reduzierung, wenn vom Nutzer im Simulation-Mode der Grundriss des Raummodells vergrößert bzw. verkleinert wird.

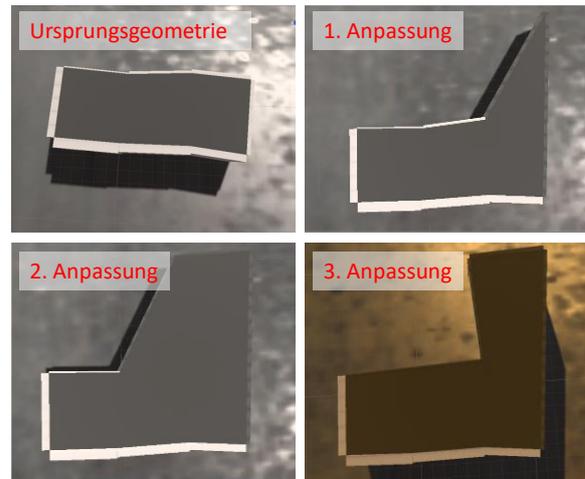


Abbildung 16: Raummodell mit flexibler Raumgeometrie: ursprünglicher Grundriss und seine Modifikationen während des Simulationsexperiments

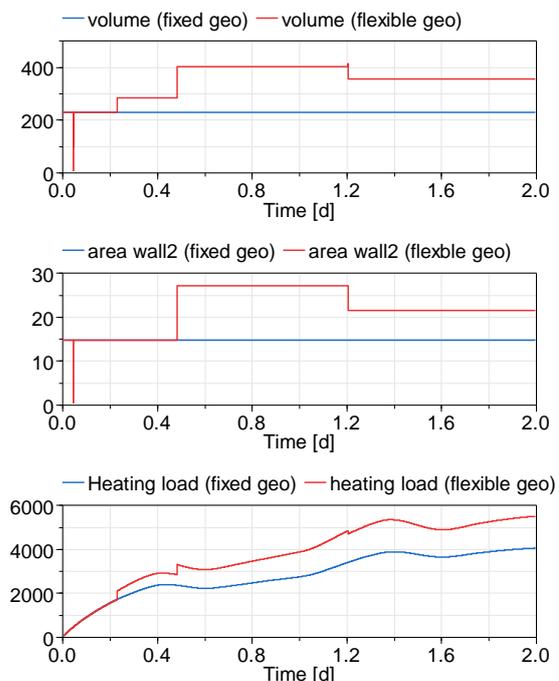


Abbildung 17: Einfluss einer flexiblen Raumgeometrie auf die Heizlast

ZUSAMMENFASSUNG

Es konnte an Hand eines Softwareprototypen grundsätzlich gezeigt werden, dass der vollständige Workflow vom Modellieren bis zum Simulieren eines thermischen Raummodells in einer VR-Simulationsumgebung stattfinden kann, wodurch der Simulationsexperte immersiv in den Workflow einbezogen wird. Hierzu gehören zum einen die Realisierung des Modelling-Modes mit an die Virtual Reality angepassten Modellierungswerkzeugen, zum

Moment einen sehr niedrigen Wert auf, was an einer kurzen Störung beim Datenaustausch zwischen Unity und Dymola liegt.

anderen die zur Bereitstellung eines Simulation-Modes mit den Möglichkeiten zur Realzeit-Simulation inkl. eines anpassbaren Realzeitfaktors, der Nutzerinteraktion mit reaktiven Gebäudeelementen sowie zur Anpassung der Raumgeometrie während des Simulationsexperiments.

AUSBLICK

Ausgehend vom vorliegenden Softwareprototypen der VR-Simulationsumgebung sollen im nächsten Schritt Erweiterungen hinzugefügt werden, die zum einen die Modellierungsmöglichkeiten deutlich erweitern, aber auch optional den Detaillierungsgrad des physikalische Gebäudemodells verfeinern lassen. Hierzu gehören zunächst die Erweiterung des Modelling-Modes um die Definitionsmöglichkeit von Einzonon- auf Mehrzonengebäudemodelle sowie eine verfeinerte Auswahlmöglichkeit der thermischen Eigenschaften der baukonstruktiven Elemente, was bereits in der genutzten Modelica-BuildingSystems-Bibliothek möglich ist. In einem weiteren Schritt soll ein räumlich diskretisiertes Modelica-Raummodell (Mucha, 2017) integriert werden, um mit der VR-Umgebung auch räumlich differenzierte Aussagen zum Innenraumklima treffen zu können.

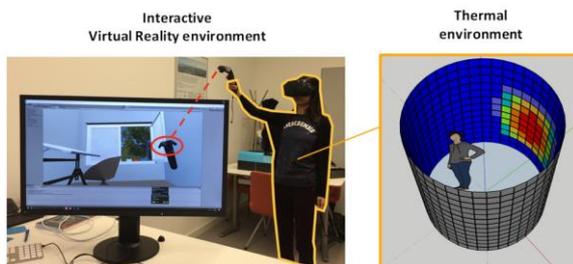


Abbildung 18: Thermisches Display als Ergänzung für die interaktive VR-Simulationsumgebung

Im laufenden Forschungsprojekt „GenEff - Neuartige Bewertung der Gebäude-Energie-Effizienz und innovative Demonstration mittels Simulationen und Virtual Reality“, soll in den nächsten Jahren ein thermisches Display entwickelt werden, mit welchem der Nutzer die im bauphysikalischen Raummodell berechneten Luft- und Strahlungstemperaturen direkt körperlich wahrnehmen kann (vgl. Abbildung 18). Hierdurch soll der immersive Eindruck bei der Analyse des bauphysikalischen Verhaltens von Innenräumen in der VR-Umgebung noch erheblich gesteigert werden.

DANKSAGUNG

Ein Teil der in diesem Beitrag dargestellten Forschungsergebnisse wurden im Projekt „EnEff BIM: Planung, Auslegung und Betriebsoptimierung von energieeffizienten Neu- und Bestandsbauten durch Modellierung und Simulation auf Basis von Bauwerkinformationsmodellen“ (Förderkennzeichen: 03ET1177D, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) erarbeitet.

LITERATUR

- Adams, M. B., New, J. R. 2018. EnergyPlus Performance Improvements via JSON Input Refactoring. Proceedings Building Performance Analysis Conference and SimBuild 2018, Chicago, USA.
- Thiele, B., Beutlich, T., Waurich, V., Sjölund, M., Bellmann, T. 2017. Towards a Standard-Conform, Platform-Generic and Feature-Rich Modelica Device Drivers Library. Proceedings 12th International Modelica Conference, Prag, Tschechien.
- Editor XR 2020: Unity-Erweiterung zur Unterstützung von Modellierung von Unity-Szenen in VR oder AR. GitHub-Repository <https://github.com/Unity-Technologies/EditorXR>
- IDA ICE 2020. IDA Indoor Climate and Energy simulation tool. Webseite: <https://www.equa.se/en/ida-ice>, letzter Zugriff 9.3.2020.
- Mucha, K. 2017. Ein Simulationsansatz zur Bewertung von Hitzestressrisiken in Innenräumen – Weiterentwicklung eines zonalen Modells in Modelica. Dissertation, Fakultät Gestaltung, Universität der Künste Berlin.
- Nytsch-Geusen, C., Banhardt, C., Inderfurth, A., Mucha, K., Möckel, J., Rädler, J., Thorade, Tugores, C. 2016. BuildingSystems – Eine modular hierarchische Modell-Bibliothek zur energetischen Gebäude- und Anlagensimulation. Proceedings BAUSIM 2016 IBPSA. Dresden, Deutschland.
- Nytsch-Geusen, C., Inderfurth, A., Kaul, W., Mucha, K., Rädler, J., Thorade, M., Tugores, C. 2017a. Template based code generation of Modelica building energy simulation models. Proceedings 12th International Modelica Conference, Prag, Tschechien.
- Nytsch-Geusen, C., Möckel, J., Rädler, J., Thorade, M. 2017b. BuildingSystems_VR - A new approach for immersive and interactive building energy simulation. Proceedings Building Simulation Conference 2017, San Francisco, USA.
- Unity 2020. Echtzeit-3D-Entwicklungsplattform Unity. Webseite: <https://unity.com/de>, letzter Zugriff 9.3.2020.
- Unite 2019. Ausschnitt aus der Keynote der Unite 2019 Conference, Kopenhagen, Dänemark.
- Treeck, C., Wenisch, P., Borrmann, A., Pfaffinger, M., Egger, M., Wenisch, O., Rank, E. 2006. Towards interactive indoor thermal comfort simulation. Proceedings ECCOMAS CFD 2006, TU Delft.
- VR 2020. Erweiterung für Sketchup zur Modellierung in der Virtual Reality. Webseite VRsketch <https://vrsketch.eu/>, letzter Zugriff 9.3.2020

BIM-BASIERTER REDUCED ORDER ANSATZ FÜR THERMISCHE GEBÄUDESIMULATIONEN

D. Jansen¹, M. Nürenberg¹ und D. Müller¹

¹RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center, Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate

KURZFASSUNG

In diesem Beitrag wird ein Tool zur Erstellung thermischer Gebäudesimulationen mit einem Reduced Order Model (ROM) Ansatz unter Nutzung statistischer Datenanreicherung vorgestellt, welcher als Basis Daten des Building Information Modeling (BIM) im IFC-Format nutzt. Vorgelagert wird eine Analyse der bestehenden Ansätze im Bereich der BIM-gestützten Modellerstellung für Simulationen durchgeführt. Die meisten dieser Ansätze sehen sich mit der unzureichenden Datenlage in aktuellen IFC-Modellen konfrontiert. Hier setzt die Kombination aus vereinfachtem Simulationsmodell und statistischer Datenanreicherung an, um die aktuellen Lücken in der Datenlage zu schließen. Die Methodik wird abschließend an einem Beispielgebäude getestet.

ABSTRACT

This paper presents a tool for creating thermal building simulations with a Reduced Order Model (ROM) approach using statistical data enrichment based on BIM data in IFC. This is preceded by an analysis of existing approaches in the field of BIM-based simulation model generation. Most of these approaches are confronted with the poor data quality in current IFC models. This is where the combination of a simplified simulation model and statistical data enrichment closes the current gaps. The methodology is tested on an exemplary building.

MOTIVATION

Die Modellierung von Simulationsmodellen für die thermische Gebäudesimulation von Wohn- und Nichtwohngebäuden stellt einen zeitaufwändigen und fehleranfälligen Prozess dar. Eine Simplifizierung dieses Prozesses kann mittel- bis langfristig dabei unterstützen die Nutzungshemmnisse von dynamischen Simulation zur Vorhersage thermischer Bedarfe von Gebäuden abzubauen. Mit den gewonnenen Bedarfsprognosen können bedarfsgerechte Konzepte für die Anlagentechnik entwickelt werden, was wiederum den thermische Komfort und den effizienten Betrieb der Anlagentechnik positiv beeinflussen kann. Letzteres führt schließlich zu geringeren Endenergiekosten und

zur Reduzierung des vom Gebäudesektor verursachten Primärenergiebedarf.

BIM-Modelle können potentiell bereits nahezu alle Informationen, welche für die Modellerstellung benötigt werden, in ausreichender Qualität beinhalten und somit als Datengrundlage für eine (teil-) automatisierte Modellerstellung dienen.

Eine Herausforderung besteht darin, dass aufgrund der abweichenden Zielsetzungen von BIM-Modellen und Simulationsmodellen viele der notwendigen Daten im Planungsprozess nicht in den Modellen gespeichert werden, da sie von Planungsseite keinen offensichtlichen Mehrwert für das Modell haben. Neben diesem Einfluss auf die Datenqualität des BIM-Modells ist der Export in ein offenes Austauschformat der zweite Aspekt, welcher über die Qualität des entstehenden Datenmodells entscheidet. Die Export Qualität hängt dabei sowohl von den Exporteinstellungen als auch vom Export-Tool ab (Ivanova, Kiesel, and Mahdavi 2015) (Spiridigliozzi et al. 2019). Trotz einer guten Modellqualität im BIM-Modell können die IFC-Daten nach dem Export von unzureichender Qualität sein. (Giannakis et al. 2019) Daher ist eine direkte Überführung der exportierten BIM-Daten zur Simulation nur schwierig umzusetzen. Stattdessen müssen die bestehenden Daten analysiert, interpretiert, aufbereitet und teilweise angereichert werden, um ein vollständig parametrisiertes Simulationsmodell zu erhalten.

Es existieren zwei verbreitete Formate zum interoperablen Austausch von BIM-Daten über verschiedene Softwaretools. IFC kann Informationen zu nahezu allen Domänen im Bauprozess speichern. Das Datenformat wird von buildingSMART (buildingSMART e.V. 2020.) entwickelt. Dahingegen fokussiert gbXML (gbXML 2020) sich auf ökologische und energetische Aspekte der Bauphysik. Beide Formate sind hierarchisch aufgebaut und haben sich in den letzten Jahren hinsichtlich der abbildbaren Anzahl von Entitäten weiterentwickelt.

Mittelfristig wird mit dem vorgestellten Tool auch die HVAC-Simulationen basierend auf den eingelesenen BIM-Daten angestrebt. IFC ist hinsichtlich der Abbildung der HVAC-Domäne weiter fortgeschritten

(Häfele 2014). Dies und der hierarchische Aufbau, sowie die Tatsache, dass IFC von mehr Software-Tools im BIM-Bereich unterstützt wird und die bessere Informationslage bietet, sind die Gründe, warum IFC als Datenformat für das vorgestellte Tool gewählt wurde. (Spiridigliozzi et al. 2019) (Hitchcock, Wong, and Consulting 2011)

Ziel des vorgestellten Ansatzes ist es schnelle und robuste Simulationsmodelle auf Basis von BIM-Modellen zu generieren. Mit diesem Ansatz ist es möglich, den stark iterativ geprägten Bau- und Planungsprozess von Gebäuden durchgehend zu begleiten und ohne Mehraufwand bei jeder Änderung eine neue Analyse der thermischen Bedarfe auf Basis dynamischer Simulationsmodelle durchzuführen (s. Abbildung 1).

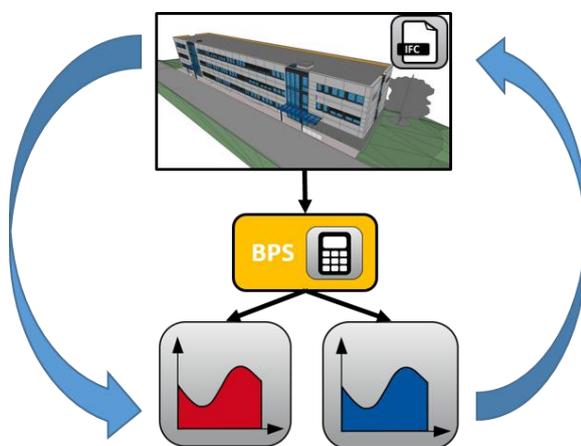


Abbildung 1: Durchgehende simulative Unterstützung im Planungsprozess

Weiterhin können mit dieser Methodik schnell verschiedene Planungsalternativen verglichen werden und so der Auslegungs- und Planungsprozess unterstützt werden.

Um die aufgezeigte Zielsetzung zu erfüllen, wird zur Modellgenerierung das Tool TEASER (Remmen et al. 2018) genutzt. Es erstellt ein Reduced Order Modell (ROM) in *Modelica*. Die erstellten Modelle sind nicht räumlich aufgelöst, sondern basieren auf einem thermischen Netzwerk reduzierter Ordnung (Lauster, Dirk Müller, und Nytsh-Geusen 2018), dessen Grundlage die VDI 6007-1 bildet (VDI 6007 2015.). Der ROM-Ansatz stellt einen robusten und schnellen Modellierungsansatz dar.

Vorhandene Ansätze, sehen sich mit Problematiken aufgrund der Qualität des BIM-Modells konfrontiert. Dies sind bspw. fehlende Wandstücke, nicht korrekt modellierte Fenster oder nicht korrekt zueinander referenzierte Elemente (Kim et al. 2015). Insbesondere der letzte Punkt, die Referenzierungen aller Bauteile untereinander, muss analysiert werden und in das Simulationsmodell übertragen werden.

Diese Aufgabe ist schwierig zu automatisieren, da in BIM diverse Möglichkeiten bestehen Elemente wie bspw. Fenster und Wände oder Fußböden und Bodenbeläge zu koppeln. Weiterhin arbeiten die Exportfunktionen der gängigen BIM-Software Tools in diesem Punkt nicht einheitlich entsprechend dem IFC-Standard. Diese Problemstellungen ergeben sich aber nur basierend auf der geometrisch aufgelösten Betrachtung.

Bei dem reduzierten Modellansatz treten diese Herausforderungen nicht auf, da keine geometrisch aufgelösten Zusammenhänge der Komponenten betrachtet werden. Daher können vorhandene Modellierungsfehler ignoriert werden. Es ist jedoch zu beachten, dass dieses Vorgehen bei gravierenden Modellierungsfehlern zu einer unzureichenden Modellierung führen kann. Daher muss das Modell dennoch auf Validität geprüft werden.

Der vorgestellte Ansatz setzt weiterhin auf eine optionale statistische Datenanreicherung über TEASER. Dies ermöglicht es notwendige Informationen, welche nicht im IFC-Modell enthalten sind, ohne eine manuelle Nachbearbeitung aufzufüllen.

BESTEHENDE ANSÄTZE

Das Konzept, BIM-Daten als Basis für die Erstellung von Simulationsmodellen zu nutzen, ist nicht neu. Bereits kurz nach der Einführung des IFC-Schemas wurden die ersten Arbeiten dazu veröffentlicht (Bazjanac and Maile 2004; O'Sullivan and Keane 2005). Grundsätzlich lassen sich die seither entstandenen Ansätze in Forschungsarbeiten und kommerzielle Tools aufteilen. Bestehende Review-Beiträge geben einen guten Überblick über existierende Ansätze im Bereich BIM-gestützter energetischer Gebäudesimulation und deren Zielgrößen (Pezeshki, Soleimani, and Darabi 2019). Im Folgenden wird ein Überblick über Ansätze aus der Forschung gegeben, um die unterschiedlichen Methoden und Schwerpunkte herauszustellen.

Forschungsarbeiten

Einen Ansatz stellt die eigens entwickelte Modelica Library *ModelicaBIM* und das dazugehörige Framework *Revit2Modelica* dar (Kim et al. 2015). Bei diesem Ansatz wird auf ein direktes Mapping von BIM zu Modelica gesetzt, welches durch ein Preprocessing erweitert wird. Dabei wird jede relevante Komponente des BIM-Modells nach Modelica übertragen. Der Ansatz zeigt vielversprechende Ergebnisse für die aufgezeigten Testfälle.

Einen weiteren Ansatz stellt das Tool *ABEMAT* dar, welcher von (Kamel and Memari 2018) entwickelt wurde. Dieses setzt als Quelle auf das gbXML Format und zur Simulation auf eine modifizierte Version von EnergyPlus. Die gbXML-Datei wird dazu in einem

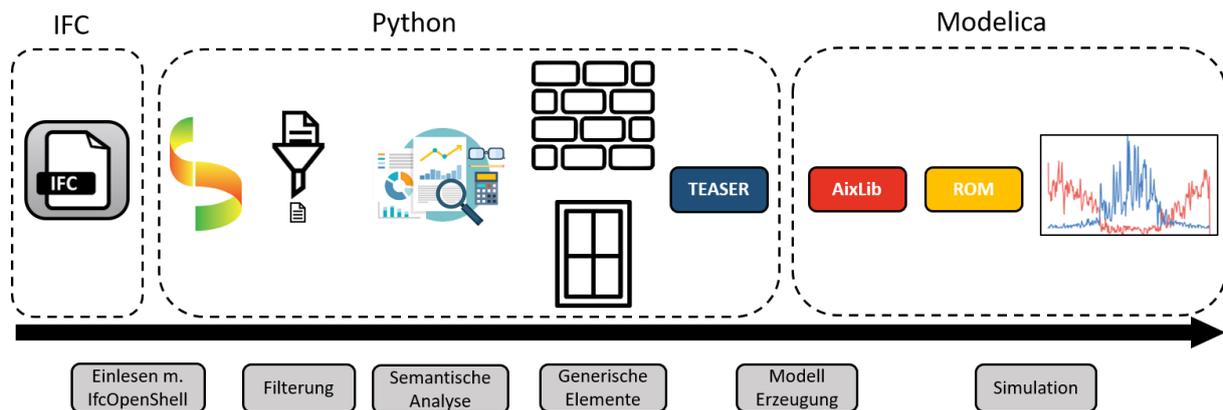


Abbildung 2: Ablaufschema der Modellerstellung und Simulation

Preprocessing bereinigt, anschließend in OpenStudio eingelesen und dort eine IDF-Datei erzeugt. Der Fokus liegt auf der dedizierten Analyse der Wärmeströme in einzelnen Bauteilen.

Das Tool *BIM2Modelica* (Nytsch-Geusen et al. 2019), erweitert das Tool *CoTeTo* (Nytsch-Geusen et al. 2017) um die Möglichkeit, IFC 2x3-Dateien in Mehrzonen-Modelle in Modelica umzuwandeln. Dieses wird dann mit JModelica simuliert. Die erzeugten Modelle basieren auf der Modelica-Bibliothek *BuildingSystems*, deren Kern wiederum die *IBPSA*-Bibliothek bildet. Diese wird auch von der in diesem Beitrag vorgestellten Modellbibliothek *AixLib* (Müller et al. 2016) genutzt.

Der in diesem Beitrag vorgestellte Einsatz eines ROM in Kombination mit zusätzlicher Datenanreicherung zur schnellen Entwicklung von robusten Simulationsmodellen stellt eine neue vielversprechende Methodik dar.

METHODIK

Das aus den eingangs aufgestellten Überlegungen resultierende Ablaufschema ist in Abbildung 2 dargestellt. Die BIM-Daten des Gebäudes werden in Form des IFC-Datenformats mithilfe des Tools *IfcOpenShell* (IfcOpenShell 2020) in die entwickelte Python-Toolchain eingelesen. Die eingeladenen Daten werden gefiltert und nur die für thermische Gebäudesimulation notwendigen IFC-Objekte beibehalten. Die zu den IFC-Objekten enthaltenen Informationen werden anschließend in generische Objekte gemapped. Dabei werden semantische Analysefunktionen angewandt, um die erhaltene Informationsmenge zu maximieren. Anschließend werden die Informationen bei Bedarf statistisch angereichert. Dieser Schritt wird nur für nicht vorhandene Informationen durchgeführt, wird protokolliert und an den Nutzer gemeldet. Die generischen Elemente werden dann an TEASER übergeben, welches die Informationen über Templates, basierend auf der Mako-Bibliothek (Bayer, 2020), nach Modelica übersetzt. Das

entstandene Modell kann dann unter Nutzung der öffentlich verfügbaren Bibliothek *AixLib* simuliert werden.

Der gesamte, der Simulation vorgelagerte, Prozess läuft dabei komplett innerhalb eines Tools ab, womit kein Wechsel zwischen verschiedenen Oberflächen notwendig ist. Im Folgenden sollen drei Aspekte der Methodik besonders herausgestellt werden:

- Semantische Analyse u. generisches Mapping
- Thermische Zonen
- Interne Lasten u. Randbedingungen

Semantische Analyse u. generisches Mapping

Für die gesamte Datenverarbeitung nach dem Einladen des IFC-Modells werden generische Abbilder von allen für die thermische Gebäudesimulation erforderlichen Objekttypen genutzt. Dieser Zwischenschritt ist notwendig, da nicht in allen Fällen ein direktes 1:1 Mapping der Komponenten erfolgen kann, da die Zielsetzung von BIM und der thermischen Gebäudesimulation teilweise abweichend sind. In IFC existiert bspw. eine allgemeine Klasse *IfcSlab*, welche zur Abbildung von Zwischendecken, Zwischenböden, Bodenplatten und Dächern genutzt wird. Diese vier Elementtypen, welche auf der gleichen Klasse basieren, müssen in der thermischen Gebäudesimulation differenziert abgebildet werden. Dieser Vorgang kann unter dem Begriff *One-to-Many Mapping* zusammengefasst werden und im konkreten Beispiel über den *PredifinedType* der Elemente gelöst werden. Im Gegensatz dazu existieren im IFC-Schema mehrere Möglichkeiten eine Wand abzubilden. Die relevantesten sind *IfcWall* und *IfcWallStandardCase*. Beide werden in der Simulation als Wand dargestellt, was als *Many-to-One Mapping* bezeichnet wird.

Die Nutzung generischer Elemente ist weiterhin dahingehend sinnvoll, dass die Toolchain unabhängig vom Simulationstool aufgebaut werden kann. Neben dem in diesem Paper vorgestellten Export nach

Modelica ist auch ein Export nach EnergyPlus geplant. Zusätzlich ist es somit auch möglich, das Tool später um weitere Eingangsquellen wie gbXML oder zukünftige Formate zu erweitern.

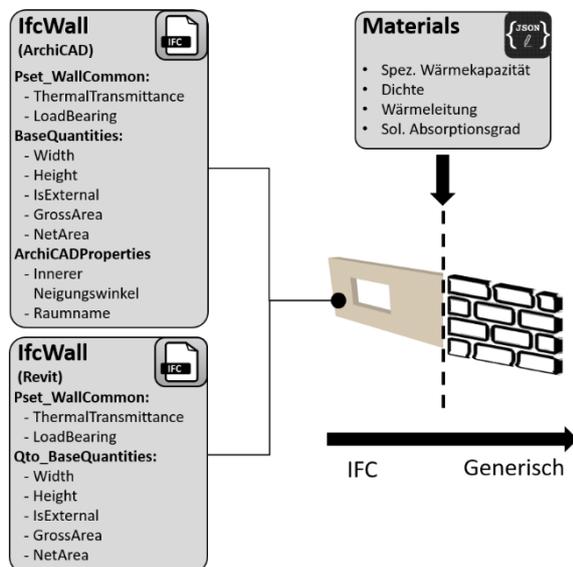


Abbildung 3: Erstellung generischer Elemente

Die Attribute der generischen Klassen werden zunächst über die vorhandenen Informationen der IFC-Datei gefüllt. Als Datenquelle dienen primär die im IFC-Standard vordefinierten *IfcPropertySets* und *IfcQuantitySets* der jeweiligen IFC-Klassen. Abseits der vom IFC-Standard vordefinierten Attribute existieren je nach gewähltem Exporttool noch weitere Attribut Sets, sogenannte Custom Property Sets. So exportiert *ArchiCAD* bspw. in seinen eigenen *ArchiCADProperties* den Neigungswinkel einer Wand semantisch, was im IFC-Standard nicht vorgesehen ist. Der Prozess des Mappings und die Anreicherung sind schematisch in Abbildung 3 dargestellt.

Um die Informationsmenge, welche aus dem BIM-Modell gewonnen wird, zu maximieren, ist eine hierarchische Suchfunktion implementiert, welche unterschiedliche Informationsquellen durchsucht und so auch unterschiedliche Exporttools der IFC-Datei berücksichtigen kann. Aktuell ist eine Unterstützung für *ArchiCAD* und *Revit* implementiert. Die Speicherorte der jeweiligen Attribute und *PropertySets* werden über *.json-Dateien* verwaltet, sodass diese auch in Zukunft einfach verwaltet werden können. Die Speicherung erfolgt dabei versionsgetrennt, da sich teilweise auch innerhalb der BIM-Software-Tools über verschiedene Release-Versionen Änderungen in den exportierten Datenstruktur ergeben.

Neben den Abmessungen und Ausrichtungen der Bauteile können auch die vorliegenden Materialeigenschaften und die daraus resultierenden Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile je nach Detailgrad des BIM-Modells ermittelt werden. Die Qualität der hinterlegten Materialeigenschaften ist in vielen Fällen jedoch nicht ausreichend. Insbesondere die spezifische Wärmekapazität ist selten in aktuellen IFC-Dateien zu finden. Hier setzt die statistische Datenanreicherung an, welche anhand der Analyse regulärer Ausdrücke die Namen der eingesetzten Materialien mit der in TEASER bestehenden Datenbank aus Materialien abgleicht. So können die fehlenden Informationen sinnvoll angereichert werden. Die aktuell rein semantisch basierte Analyse kommt jedoch an ihre Grenzen, wenn bspw. nicht definiert ist, ob es sich bei einer Wand um eine Außenwand handelt. Hier können zukünftig topologische Algorithmen ansetzen und die semantische Analyse unterstützen.

Aufgrund der Struktur des IFC-Standards ist die semantische Erkennung der Orientierung der Bauelemente bezogen auf den wahren Norden des Projekts nicht trivial. Dies hat zwei Ursachen:

- IFC nutzt relative Koordinatensysteme. Dementsprechend müssen für die Ausrichtung zwischen Element und wahren Norden hierarchisch alle dazwischen liegenden Instanzen untersucht werden.
- Es gibt auf semantischer Ebene der Bauteile keine Definition des Normalenvektors der einzelnen Bauelemente bzgl. Ausrichtung nach innen oder außen.

Konkret bedeutet der erste Punkt, dass die Ausrichtung zwischen einer Wand und dem wahren Norden des Projekt erhalten wird, indem die Informationen von *IfcWall*, *IfcStorey*, *IfcBuilding* und *IfcSite* analysiert werden.

Zur Ermittlung der Normalenvektoren wird im vorgestellten Workflow zunächst eine semantische Analyse anhand des Attributes *DirectionSense* in den *IfcRelAssociatesMaterial* Informationen genutzt. Diese Informationen sind jedoch nicht immer zuverlässig. Daher ist für die weitere Entwicklung der Toolchain geplant, die Normalenvektoren anhand der 2nd Level Space Boundaries in IFC zu erkennen. Falls die 2nd Level Space Boundaries nicht vorhanden sind, existieren bereits Ansätze diese nachträglich zu erzeugen (Lilis, Giannakis, and Rovas 2016).

Thermische Zonen

Die thermischen Zonen, welche für das in TEASER genutzte Mehrzonen-Modell des Gebäudes benötigen

werden, werden zunächst auf Basis der hinterlegten Räume im IFC-Modell erkannt. Diese *IfcSpaces* werden eingelesen und die vorher ermittelten Bauelemente zugeordnet. Die Bauelemente erstrecken sich meist über mehrere Räume (bspw. Außenwände). In diesem Fall werden die Flächen über eine *Slicing*-Funktion auf die jeweiligen Räume aufgeteilt. Mit diesem Vorgehen wird jeder Raum als eigene thermische Zone abgebildet. Da nicht jeder Raum im BIM-Modell zwangsläufig eine thermische Zone im energetischen Simulationsmodell repräsentiert, ist eine erweiterte Zuordnung notwendig. Mit dieser Problematik sehen sich auch bestehende Ansätze konfrontiert (Kim et al. 2015).

Der Aufgabe der Zonierung muss insbesondere im Hinblick auf den verwendeten Mehrzonen-Ansatz ein besonderer Stellenwert beigemessen werden. Dieser betrachtet die verschiedenen Zonen des Gebäudes als voneinander unabhängig und berücksichtigt keinen Luft- oder Wärmeaustausch zwischen den Zonen. Daher sollen im Rahmen weiterer Arbeiten Algorithmen zur sinnvollen und automatischen Zonierung entwickelt werden. Aktuell sind zwei Ansätze implementiert, bei denen entweder ein Mehrzonen-Modell erstellt wird, in dem jeder Raum als eigene Zone abgebildet wird, oder alle Räume einer gemeinsamen Zone zugeordnet werden. Dass diese beiden Ansätze abhängig von den gegebenen Randbedingungen nicht zwangsläufig sinnvoll sind, wird im Abschnitt ANWENDUNG DER METHODIK näher erläutert.

Interne Lasten u. Randbedingungen

Zur realitätsnahen Abbildung der internen Lasten wird die Nutzungsart der thermischen Zonen benötigt. Die zur korrekten Abbildung der Nutzungsart und Anwesenheit erforderlichen Daten können aus den im IFC-Standard festgelegten Eigenschaften *Pset_SpaceOccupancyRequirements* ausgelesen werden. Darüber hinaus lassen sich die Soll-Bedingungen in den thermischen Zonen aus *Pset_SpaceThermalRequirements* extrahieren. Die hier zu hinterlegenden Informationen werden jedoch von den aktuellen IFC-Exporten in *Revit* und *ArchiCAD* nicht oder nur teilweise beschrieben. Zur Erkennung der Nutzungsart wird daher analog zur bereits vorgestellten Anreicherung für Materialien eine Analyse mittels regulärer Ausdrücke auf Basis des Raumnamens durchgeführt. Dazu wird der Raumname mit den in TEASER hinterlegten Nutzungsarten, deren Daten auf DIN 18599-10 (Deutsches Institut für Normung e.V. 2018.) beruhen, abgeglichen. Die Toolchain gibt die Auswahl der Nutzungsart als Vorschlag zurück, welche dann gegebenenfalls angepasst werden kann.

Die äußeren Randbedingungen der thermischen Gebäudesimulation bilden die Wetterbedingungen.

Der Standort des Gebäudes wird auf Basis der Angaben von *RefLatitude* und *RefLongitude* in *IfcSite* ermittelt. Als Wetterdaten sind Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für die 15 Klimaregionen in Deutschland hinterlegt. Diese können bei Bedarf jederzeit im Modell ausgetauscht werden.

ANWENDUNG DER METHODIK

Zum Testen der Methodik wurde als Beispielobjekt das FZK-Haus (KIT IFC Examples 2020), welches vom KIT als IFC4-Export aus *ArchiCAD* zur Verfügung gestellt wird, gewählt. Das Beispiel verfügt über eine sehr gute Datenlage. Obwohl es sich um eine IFC-Datei handelt, welche aus der Forschung stammt, sind dennoch nicht alle notwendigen Informationen für eine thermische Gebäudesimulation vorhanden. Folgende Informationen können nicht direkt aus dem vorhandenen IFC-Modell extrahiert werden:

- Die spezifischen Wärmekapazitäten und Dichten der verwendeten Materialien fehlen.
- Die Nutzungstypen sind nicht angegeben, jedoch sind in den custom Propertysets von *ArchiCAD* die Raumnamen sinnvoll belegt.
- Die angestrebten Luftwechselraten der *Spaces* fehlen.
- Die Belegungszeiten der einzelnen *Spaces* fehlen.

Daher eignet sich die Datei um den Mehrwert der Datenanreicherung aufzuzeigen.

Das Gebäude repräsentiert ein freistehendes Einfamilienhaus (EFH) und ist in Abbildung 4 (oben) dargestellt. Es verfügt über ein Dachgeschoss und fünf Räume im Erdgeschoss. Die fünf Räume im Erdgeschoss sind in sechs *Spaces* in der IFC-Datei aufgeteilt (s. Abbildung 4 unten). Es werden zwei Szenarien hinsichtlich der Zonen-Einteilung erstellt. Das erste stellt ein Mehrzonen-Modell dar, in welchem jeder *Space* aus der IFC-Datei in eine thermische Zone überführt wird. In diesem Fall hat das Gebäude sieben thermische Zonen (sechs im EG und eine im Dachgeschoss). Das zweite ist ein Einzonen-Modell. Dazu wird das gesamte Gebäude in eine thermische Zone zusammengeführt. Die angereicherten Anwesenheitsprofile, Solltemperaturen und Luftwechselraten werden entsprechend der Volumina der einzelnen *Spaces* gemittelt.

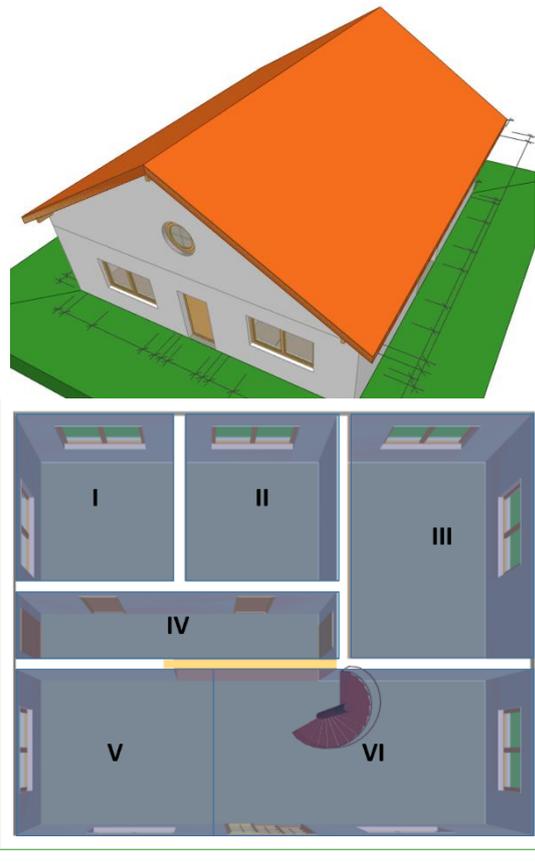


Abbildung 4: Anwendungsfall FZK-Haus

In beiden Fällen wurden die fehlenden Informationen angereichert und jeweils für ein Jahr simuliert. Die resultierenden Heizbedarfe sind als Tagesmittelwerte in Abbildung 5 dargestellt. Die kumulierten Jahresbedarfe sind in der Legende dargestellt. Es zeigt sich, dass die Auswahl der Zonierung einen deutlichen Einfluss auf die Dynamik und auch die kumulierten Jahresbedarfe hat. Die eingangs beschriebene Modellierungsweise voneinander getrennter thermische Zonen kann bei nicht sinnvoller Einteilung der Zonen dazu führen, dass der Energiebedarf zum Heizen und Kühlen in kleinen Zonen überschätzt wird, da sich die internen und externen Randbedingungen hier auf eine deutlich kleinere Kapazität auswirken als es in der Realität der Fall wäre. Gleichzeitig werden in der Realität vorhandene Spitzenlasten zu stark geglättet, wenn Zonen zu stark abweichender Randbedingungen gemeinsam betrachtet werden. Dementsprechend ist die Entwicklung von Algorithmen zur automatisierten Zonierung ein sinnvoller nächster Schritt.

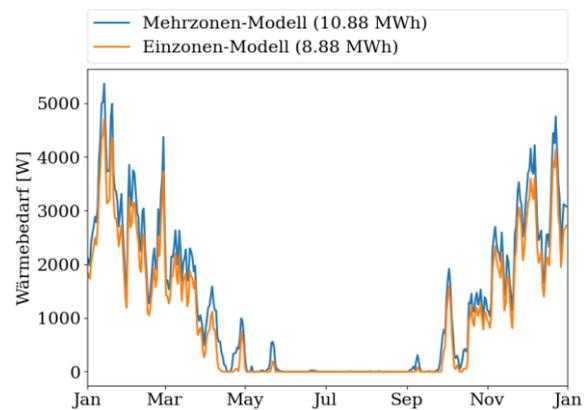


Abbildung 5: Wärmebedarfe FZK-Haus für Ein- und Mehrzonen Modell

Weiterhin soll untersucht werden, wie sensitiv das Simulationsmodell auf die angereicherten Parameter reagiert. Hierzu wird in einem ersten Ansatz die Luftwechselrate als Beispiel gewählt. In Abbildung 6 ist dazu der resultierende Wärmebedarf für das Einzonen-Modell mit zwei verschiedenen angenommenen Luftwechselraten dargestellt.

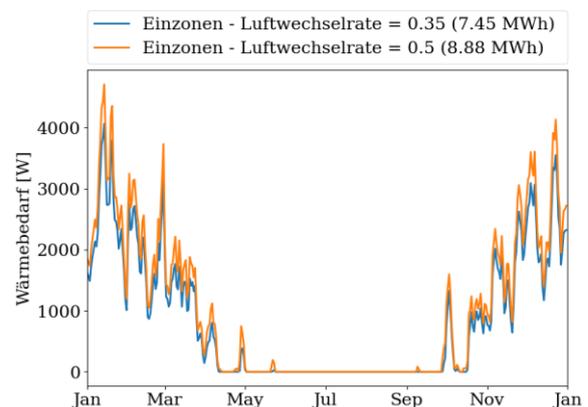


Abbildung 6: Wärmebedarf für unterschiedliche Luftwechselraten

Hierbei zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit vom variierten Parameter. Daher soll in kommenden Arbeiten eine ausführliche Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden, auf welche Parameter das Modell besonders sensitiv reagiert. Diese könnten dann von der automatisierten Anreicherung ausgeschlossen werden und stattdessen auf Basis von Nutzereingaben angereichert werden.

Die hier gezeigte ausgeprägte Sensitivität der Simulationsergebnisse hinsichtlich Parametern, welche nicht im BIM-Modell enthalten sind oder nicht korrekt nach IFC exportiert werden, zeigt die Relevanz, die eine korrekte und detailgenaue Erstellung des BIM-Modells im Planungsprozess hat. Die zukünftig angestrebte Sensitivitätsanalyse ist daher auch für die Sensibilisierung des Planungsprozesses hinsichtlich der Genauigkeit von BIM-Modellen interessant. So kann aufgezeigt werden, dass eine detailgenauere Modellierung des BIM-Modells schon zu Beginn der Planung direkt

verwertbare Vorteile, wie die kontinuierliche und automatisierte Erstellung von Bedarfssimulation, für den gesamten Planungsprozess mit sich bringt.

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag wurde ein Ansatz zur Überführung von BIM-Modellen in dynamische Modelica Simulationsmodelle zur energetischen Untersuchung von Gebäuden vorgestellt. Dieser setzt auf die Kombination aus einem Reduced Order Model und der statistisch gestützten Anreicherung nicht im BIM-Modell vorhandener Informationen. Der Ansatz grenzt sich zu kommerziellen Tools insbesondere durch die freie Weiterverarbeitung der resultierenden Modelle ab, da diese in Modelica beliebig angepasst und erweitert werden können. Mit diesem Vorgehen können schnelle und robuste Simulationsmodelle automatisiert und mit nur geringem Nutzaufwand generiert werden. Die Kombination aus ROM und Datenanreicherung ist ein Schritt zur Schließung der Lücke zwischen unzureichender Qualität von heute in der Praxis vorkommenden BIM-Modellen und der automatischen Generierung von Simulationsmodellen. Durch den Zwischenschritt über generische Elemente anstelle eines direkten Mappings zwischen BIM- und Simulationsmodell ist sowohl die Schnittstelle der Eingangs- als auch Ausgabedaten flexibel. Zukünftig können sowohl weitere Eingabeformate wie gbXML als auch weitere Simulationstools wie EnergyPlus unterstützt werden.

Der bestehende Ansatz kann weiterhin neben der aktuell rein semantisch basierten Analyse um topologische Analysen erweitert werden, welche den Informationsgewinn durch die BIM-Daten weiter erhöhen.

Es zeigt sich, dass weitere Untersuchungen, insbesondere im Hinblick auf eine sinnvolle Zonierung der Modelle, beim verwendeten Ansatz notwendig sind, um die Validität der erzeugten Simulationsmodelle zu erhöhen. Auch soll die Sensitivität der Simulationsmodelle hinsichtlich der angereicherten Parameter weiter untersucht werden und ein Ansatz entwickelt werden, der es erlaubt für eingeladene BIM-Modelle die fehlenden Parameter auszugeben, welche einen kritischen Einfluss auf die Simulation haben. Die entwickelte Methodik ermöglicht es eine Vielzahl an Parametervariationen auf verschiedene Gebäude anzuwenden. So kann eine systematische Auswertung zur Relation zwischen Modellierungsgenauigkeit in BIM und Validität der erzeugten Simulationsmodelle aufgestellt werden. Eine solche Studie kann als Leitobjekt für den Planungsprozess dienen, um die genauere Modellierung im frühen Stadium von BIM-Modellen zu motivieren.

DANKSAGUNG

Wir danken für die finanzielle Unterstützung durch das BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie), Förderkennzeichen 03ET1562A. In diesem wird neben der thermischen Gebäudesimulation auch an der Erstellung von Simulationsmodellen für die Anlagensimulation und CFD-Simulation, sowie der LCA Analyse auf Basis von BIM-Daten gearbeitet.

LITERATUR

- Bayer, Michael. 2020. "Mako Templates for Python" <https://www.makotemplates.org/> (Juli 3, 2020).
- Bazjanac, Vladimir, and Tobias Maile. 2004. "IFC HVAC Interface to EnergyPlus-A Case of Expanded Interoperability for Energy Simulation." Simbuild.
- BuildingSMART e.V. <https://www.buildingsmart.de/> (April 3, 2020).
- Deutsches Institut für Normung e.V. 2018. Energetische Bewertung Von Gebäuden – Berechnung Des Nutz-, End- Und Primärenergiebedarfs Für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser Und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten.
- gbXML. 2020. "GbXML Green Building XML Schema." <https://www.gbxml.org/> (April 3, 2020).
- Giannakis, Georgios, K.I. Katsigarakis, Georgios Lilis, and Dimitrios Rovas. 2019. "A Workflow for Automated Building Energy Performance Model Generation Using BIM Data." In Proceedings of Building Simulation 2019: 16th Conference of IBPSA, Rome, Italy.
- Häfele, Karl-Heinz. 2014. "IFC and GbXML, 2 Building Information Models for Building Performance Simulation."
- Hitchcock, Robert J, Justin Wong, and Hitchcock Consulting. 2011. "Transforming Ifc Architectural View Bims for Energy Simulation." In Proceedings of Building Simulation, Sydney, Australia.
- IfcOpenShell. 2020. IfcOpenShell. <https://github.com/IfcOpenShell/IfcOpenShell> (April 4, 2020).
- Ivanova, Ira, Kristina Kiesel, and Ardeshir Mahdavi. 2015. "BIM-Generated Data Models for EnergyPlus: A Comparison of GbXML and IFC Formats." In Proceedings of Building Simulation 2015: 14th Conference of IBPSA, Hyderabad, India.
- Kamel, Ehsan, and Ali M. Memari. 2018. "Automated Building Energy Modeling and Assessment Tool (ABEMAT)." Energy 147: 15–24.

- Kim, Jong Bum et al. 2015. "Developing a Physical BIM Library for Building Thermal Energy Simulation." *Automation in Construction* 50.
- Häfele, Karl-Heinz and Brenner, Joachim 2020 "KIT IFC Examples." <http://www.ifcwiki.org>.
- Lauster, Moritz Robert, Dirk Müller, und Christoph Nytsch-Geusen. 2018. Parametrierbare Gebäudemodelle für dynamische Energiebedarfsrechnungen von Stadtquartieren. 1st ed. Aachen: E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen University.
- Lilis, Georgios, Georgios Giannakis, and Dimitrios Rovas. 2016. "Automatic Generation of Second-Level Space Boundary Topology from IFC Geometry Inputs." *Automation in Construction* 76.
- Müller, D et al. 2016. "Aixlib – An Open-Source Modelica Library Within the Iea-Ebc Annex 60 Framework." In *Conference Proceedings of Central European Symposium on Building Physics*, Dresden, Germany.
- Nytsch-Geusen, Christoph et al. 2017. "Template Based Code Generation of Modelica Building Energy Simulation Models." In *Proceedings of the 12th International Modelica Conference*, Prague, Czech Republic: Linköping University Electronic Press.
- Nytsch-Geusen, Christoph, Jörg Rädler, Matthis Thorade, and Carles Ribas Tugores. 2019. "BIM2Modelica – An Open Source Toolchain for Generating and Simulating Thermal Multi-Zone Building Models by Using Structured Data from BIM Models." : 1.
- O'Sullivan, Barry, and Marcus Keane. 2005. "Specification of an IFC Based Intelligent Graphical User Interface to Support Building Energy Simulation." In *Proceedings of the Ninth International IBPSA Conference*, Montréal, Canada.
- Pezeshki, Z., A. Soleimani, and A. Darabi. 2019. "Application of BEM and Using BIM Database for BEM: A Review." *Journal of Building Engineering* 23. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352710218309501> (March 21, 2020).
- Remmen, Peter et al. 2018. "TEASER: An Open Tool for Urban Energy Modelling of Building Stocks." *Journal of Building Performance Simulation* 11.
- Spiridigliozzi, Giulia et al. 2019. "BIM Tools Interoperability for Designing Energy-Efficient Buildings." In *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics.
- VDI 6007. 2020 - Berechnung Des Instationären Thermischen Verhaltens von Räumen Und Gebäuden.

IMPLEMENTIERUNG VON KI-BASIERTEN REFERENZPROZESSEN FÜR DIE COMPUTERGESTÜTZTE OBJEKTERKENNUNG IM GEBÄUDE

M. Leonhardt¹, N. Pauen¹, L. Kirnats¹, J.-N. Joost¹, J. Frisch¹, C. van Treeck¹

¹E3D - Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen, RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

KURZFASSUNG

Im Gebäudesektor und speziell in der Bauwirtschaft resultieren aus der Digitalisierung im Rahmen des Building Information Modeling (BIM) heterogene Datenmengen. Die darin enthaltenen visuellen Informationen können für eine Objekterkennung, die auf dem Konzept der Künstlichen Intelligenz (KI) beruht, genutzt werden. Die vorliegende Entwicklung eines datengetriebenen Referenzprozesses behandelt diese Problemstellung. Unter Zuhilfenahme des KI-basierten Objekterkennungssystems PointNet können innerhalb eines Gebäudes Objekte klassifiziert und Szenen semantisch segmentiert werden. Das ursprünglich für Punktwolken konzeptionierte Objekterkennungssystem wird dahingehend erweitert, dass auch Gebäudedatenmodelle im Format der Industry Foundation Classes (IFC) für die Objekterkennung verwendet werden können. Diese Vorgehensweise führt insbesondere im Gewerk der technischen Gebäudeausrüstung zu einer Erweiterung der vorhandenen Datengrundlage, die für die maschinelle Objekterkennung notwendig ist.

ABSTRACT

In the building sector and especially in the construction industry, digitization in the context of Building Information Modelling (BIM) results in heterogeneous data. The visual information contained can be used for object recognition based on the concept of Artificial Intelligence (AI). The present development of a data-driven reference process deals with this problem. Using the AI-based object recognition system PointNet, objects within a building can be classified and scenes can be semantically segmented. The object recognition system, originally designed for point clouds, will be extended so that building data models in the Industry Foundation Classes (IFC) format can also be used for object recognition. This approach leads to an extension of the existing data sets, especially with regard to the building technology, which is necessary for AI-based object recognition.

EINLEITUNG

Die digitale Transformation bezeichnet im Allgemeinen nicht nur die Weiterentwicklung von

technischen Möglichkeiten, sondern vielmehr die Integration von intelligenten Daten in das gesamte, menschliche Handeln (IDC 2018). Die dadurch erzeugten Datenmengen bieten zum jetzigen Zeitpunkt unausgeschöpfte Potenziale, die viele Fragestellungen und Probleme des Alltags lösen könnten (BMW 2018). Auch die Bauwirtschaft bleibt hiervon nicht unberührt. Sie ist in Deutschland aktuell einer der am geringsten digitalisierten Wirtschaftszweige (Accenture Strategy 2016). Dementsprechend groß sind die Entwicklungspotenziale. Der herkömmliche Informationsaustausch innerhalb des Gebäudesektors bei Bau, Umbau oder im Facility Management eines Bauwerks entspricht der Übermittlung von technischen Zeichnungen sowie von Informationen über das Bauwerk in grafischer Form (beispielsweise Grundrisse, Ansichten oder Schnitte). Diese Zeichnungen und Dateien, die große Informationsmengen beinhalten, können vom Computer meist nicht selbstständig verarbeitet und interpretiert werden (Borrmann et al. 2015).

Building Information Modeling (BIM) bietet dabei genau jene Datenbasis für den Gebäudesektor, die für digitalisierte Anwendungen und Prozesse notwendig ist. Informationen werden dabei durch eine logische Verknüpfung verschiedener Datenbanken als 3D-Gebäudemodell digital aufbereitet und im Lebenszyklus an die Beteiligten übergeben (van Treeck et al. 2016). Die Industry Foundation Classes (IFC) (ISO 16379 2013) sind das gängigste Produktdatenmodell zur Weitergabe dieser Informationen (Hausknecht and Liebich 2016). Das Modell basiert auf EXPRESS und ermöglicht mit über 800 Objektdefinitionen und tausenden Eigenschaften im Release IFC4.1 (buildingSMART 2020) einen herstellerneutralen Datenaustausch über alle Phasen des Projektlebenszyklus.

Neben diesen digitalen Gebäudemodellen aus der Planung gibt es eine weitere relevante dreidimensionale Repräsentation eines existierenden Gebäudes. Durch digitalisierte Bestandsaufnahmen werden Punktwolken mit Hilfe von Topometrie, stationären oder mobilen 3D-Laserscannern oder durch Photogrammetrie (Hichri et al. 2013) generiert. Jeder Punkt P_i dieser Punktwolke ist dabei ein

mehrdimensionaler Vektor und wird mindestens durch die drei Koordinaten $(x_i, y_i, z_i)^T \in \mathbb{R}^3$ beschrieben. Punktwolken sind dabei nicht nach einzelnen Objekten segmentiert, sondern umfassen ganze Szenen. Das Forschungsgebiet der As-Built-Dokumentation behandelt in diesem Zusammenhang die Verarbeitung und Überführung der Punktwolken in Gebäudedatenmodelle.

Ein Werkzeug zur Nutzung der geometrischen und visuellen Daten aus den digitalen Modellen im Gebäudesektor ist die Computer Vision als Teilgebiet der Künstlichen Intelligenz. Das Gebiet der Computer Vision umfasst die computergestützte Lösung von Aufgabenstellungen, die sich an den Fähigkeiten des menschlichen visuellen Systems orientieren. Dazu gehört unter anderem die Bildklassifizierung, die Objektlokalisierung und die semantische Segmentierung (Süße and Rodner 2013). Diese Aufgaben sind in Abbildung 1 dargestellt.

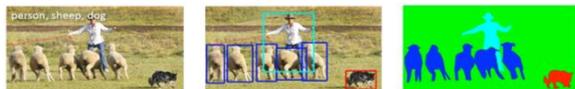


Abbildung 1: Bildklassifizierung (links), Objektlokalisierung (mitte) und semantische Segmentierung (rechts) (Lin et al., 2013)

Vielversprechende Forschungsansätze verwenden zur Lösung der Objekterkennung das Konzept des Deep Learning. Deep Learning ist eine spezielle Art des überwachten Lernens im Bereich des Machine Learning und ermöglicht es dem Computer, komplexe Konzepte aus einfacheren Konzepten aufzubauen. Weitere Informationen hierzu sind (Goodfellow et al. 2016) zu entnehmen.

Das vorliegende Paper präsentiert einen Referenzprozess, um visuelle und geometrische Daten aus digitalen Gebäudemodellen mithilfe des Computers automatisiert zu verarbeiten und zu interpretieren. Es wird ein existierendes Objekterkennungssystem, das zum aktuellen Zeitpunkt keine Gebäudedatenmodellen verarbeiten kann, als Grundlage verwendet und durch den vorangestellten Referenzprozess erweitert. Das Ergebnis ist die Klassifizierung von Objekten und die semantische Segmentierung von Szenen sowohl in Punktwolken als auch in *.ifc-Dateien innerhalb eines einzigen Systemes.

STAND DER FORSCHUNG

Objekterkennungssysteme für 2D-Daten sind zum aktuellen Zeitpunkt wesentlich weiter entwickelt als jene für 3D-Daten, da die Verfügbarkeit der Daten schon länger sichergestellt ist (Su et al. 2015). Die zunehmende Entwicklung von dreidimensionalen Datensätzen ist hauptsächlich durch die fortschreitende Technologie in Hinsicht auf die Hardware begründet und bildet die Grundlage der Entwicklung dreidimensionaler Objekterkennungs-

systeme (Armeni et al. 2017). Bei diesen Systemen muss in einem ersten Schritt differenziert werden, ob sie für Punktwolken oder Oberflächenmodelle konzipiert sind (Wang et al. 2019).

Oberflächenmodelle entsprechen in erster Linie synthetischen Abbildungen der Objekte. In der Literatur existieren zwei unterschiedliche Ansätze, die ansichtsbasierte und die volumenbasierte Objekterkennung. Ansichtsbasierte Systeme reduzieren im Vorhinein die Dimension der Daten durch ein sogenanntes Rendering, sodass die 3D-Form aus den entstehenden Ansichten erlernt werden kann (Han et al. 2019). Diese Ansichten werden dann durch die weitaus höher entwickelten Objekterkennungssysteme für 2D- bzw. 2.5D-Daten weiterverarbeitet.

Volumenbasierte Ansätze hingegen extrahieren die Merkmale direkt aus den 3D-Oberflächenmodellen. Sie können dahingehend unterschieden werden, ob sie als Repräsentation Voxel Grids (Sedaghat et al. 2016, Brock et al. 2016), Meshes (Boscaini et al. 2015, Han et al. 2018) oder sonstige Repräsentationen wie Graph Pooling (Dominguez et al. 2018) verwenden. Diese Ansätze können jedoch keine reinen Punktwolken verarbeiten.

Werden bei der Bestandsaufnahme von existierenden Gebäuden ausschließlich die visuellen Gebäudedaten, also Geometrie und Topologie, betrachtet, so wird eine Überführung der Punktwolken in Meshes bzw. Voxel Grids als Oberflächenrekonstruktion bezeichnet. Die Systeme ShapeNet (Wu et al. 2015) und VoxNet (Maturana and Scherer 2015) transformieren gegebene Punktwolken in dreidimensionale Repräsentationen und führen daraufhin einen volumenbasierten Ansatz der Objekterkennung durch. Derzeit steht die Wissenschaft jedoch noch vor dem Problem, die gewonnenen Erkenntnisse auf ganze Szenen anzuwenden. Dies ist aber für die semantische Segmentierung unabdingbar, weshalb eine Datenvorbereitung der Punktwolken durch die Rekonstruktion der Oberflächen auszuschließen ist (Cheraghian and Petersson 2019).

Das System PointNet (Qi et al. 2017a) kann Punktwolken ohne vorherige Vorverarbeitung mit einer hohen Genauigkeit klassifizieren und semantisch segmentieren. Parallel zur Entwicklung von PointNet wurde in (Ravanbakhsh et al. 2016) ein Modell aus Layern beschrieben, das Merkmale aus ungeordneten Mengen extrahiert. Diese Layer liegen allerdings hinsichtlich der Genauigkeit sowie der Anwendungsfälle hinter PointNet. Die darauffolgenden Werke, die Punktwolken ohne Transformation verwenden, basieren und verbessern jeweils einen Teil von PointNet. In (Angelina Uy and Hee Lee 2018, Wang et al. 2018) wird die Aggregation von PointNet verbessert. Generelle Verbesserungen hinsichtlich der Feature Extraction wurden im Rahmen von (Qi et al. 2017b, Li et al. 2018, Wang et

al. 2019) entwickelt. Eine Verbesserung der Extraction von lokalen Features erfolgte in (Xu et al. 2018, Liu et al. 2019). Die veröffentlichte Arbeit 3DCapsule (Cheraghian and Petersson 2019) bietet, basierend auf der Vorverarbeitung von PointNet, einen alternativen Classifier, der nicht auf Fully Connected Layern basiert.

Ein Vergleich der Ansätze am Benchmark ModelNet40 ist in Tabelle 1 gegeben.

*Tabelle 1:
Vergleich der 3D-Objekterkennung für die
Objektklassifizierung sowie semantische
Segmentierung von Punktwolken anhand der
Gesamtgenauigkeit (Overall Accuracy) in Prozent*

Ansatz	Klassifizierung	Segmentierung
Qi et al., 2017a	89.2	78.62
Wang et al., 2019	93.5	84.1
Qi et al., 2017b	91.9	x
Xu et al., 2018	92.4	x
Wang et al., 2018	89.9	x
Cheraghian and Petersson, 2019	92.7	x
Ravanbakhsh et al., 2016	87	x
Achlioptas et al., 2017	84.5	x
Li et al., 2018	93.4	x

METHODIK

Anforderungen

Unter Beachtung der verfügbaren Datengrundlage und dem aktuellen Forschungsstand im Bereich der Objekterkennung ergeben sich vier zentrale

Anforderungen an das Objekterkennungssystem und den Referenzprozess:

- I. Die Objekterkennung basiert auf Deep Learning.
- II. Das Objekterkennungssystem kann mit den zentralen 3D-Repräsentationen, also Gebäudedatenmodellen und Punktwolken, umgehen.
- III. Repräsentativ für das BIM-Modell ist eine Abbildung dessen im IFC-Datenformat, also auf physischer Ebene eine *.ifc-Datei.
- IV. Objekte können klassifiziert und Szenen semantisch segmentiert werden.

Es existiert kein Deep-Learning-basiertes Objekterkennungssystem, das sowohl rohe Punktwolken als auch 3D-Oberflächenmodelle für die Anwendungsfälle der Klassifizierung und der semantischen Segmentierung verarbeiten kann. Mit Ausnahme der Möglichkeit zur Verarbeitung von Gebäudedatenmodellen, repräsentiert durch das IFC-Datenformat, entspricht das Objekterkennungssystem PointNet allen Anforderungen. Zudem basieren alle weiteren Frameworks zur Verarbeitung von Punktwolken auf PointNet. Die Adaptivität hinsichtlich der Systemanpassung von PointNet ist somit als hoch einzuschätzen. PointNet unterstützt außerdem als einziges Framework für Punktwolken sowohl die Klassifizierung als auch die semantische Segmentierung vollumfänglich. Da die Erweiterung von (Wang et al. 2019), die gemäß Tabelle 1 eine höhere Genauigkeit aufweist, zum Zeitpunkt der Entwicklung der Methodik noch nicht veröffentlicht worden war, wird PointNet (Qi et al. 2017a) im Weiteren für die Entwicklung des datengetriebenen Referenzprozesses verwendet. Der Referenzprozess erweitert das Objekterkennungssystem also dahingehend, dass allen genannten Anforderungen entsprochen wird.

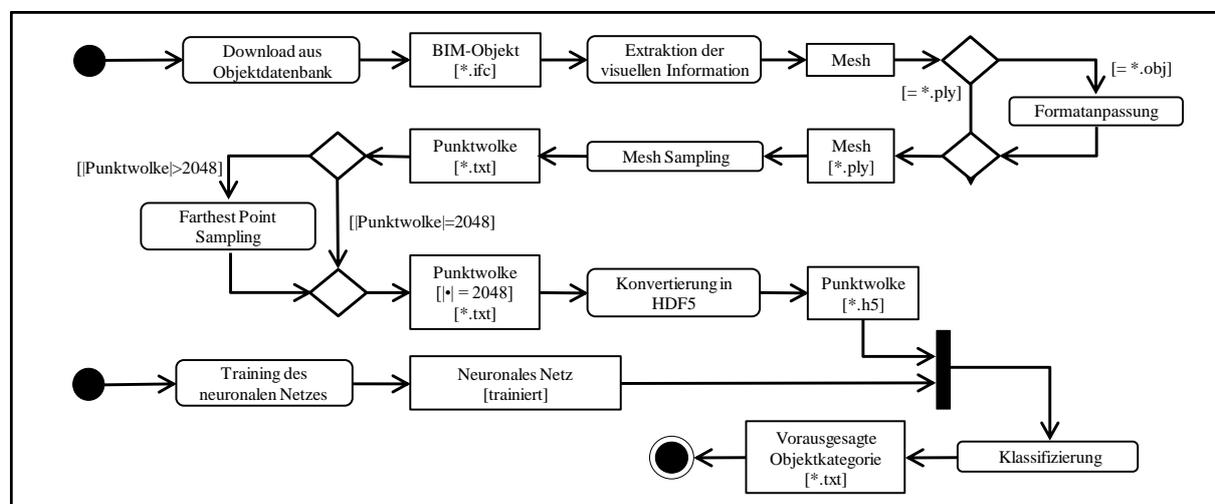


Abbildung 2: Datengetriebener Referenzprozess der Klassifizierung als UML-Diagramm

Klassifizierung

Der datengetriebene Referenzprozess für die Klassifizierung ist Abbildung 2 zu entnehmen.

Produktkataloge werden in sogenannten BIM-Objektdateibanken zusammengefasst und ergänzen bei der Modellierung von Gebäuden die Modellbibliothek in einer CAD-Umgebung (van Treeck et al. 2016). Diese Datenbanken enthalten parametrische Modelle der Bauprodukte in verschiedenen Formaten. Exemplarisch wird die Datenbank bimobject verwendet.

Die Datengrundlagen der Informationsextraktion sind die *.ifc-Dateien von Objekten. Innerhalb des Resource Layers ist die Geometrie und Topologie des Objektes enthalten. Diese visuellen Informationen müssen aus der physischen *.ifc-Datei extrahiert und anschließend in einem geeigneten 3D-Geometrieformat abgespeichert werden. Dafür kann das Tool IFCConvert aus der IFCOpenShell Bibliothek (Krijnen 2012) verwendet werden. Das Ergebnis dieses Vorgangs sind die jeweils in einer *.obj-Datei gespeicherten Meshes der Objekte.

Im nächsten Schritt wird ein Mesh Sampling durchgeführt. In diesem Prozess werden die Meshes in Punktwolken überführt, indem auf den Flächenstücken der Meshes durch Abtast-Algorithmen zufällig erzeugte Punkte generiert werden. Dieses Mesh Sampling kann durch die Verwendung der Python-Bibliothek PyntCloud erfolgen. Das Ergebnis dieses Vorgangs ist jeweils die Punktwolke des Objektes mit der Mächtigkeit von 2.048 oder größer als *.txt-Datei. Da PointNet als Input Punktwolken mit einer Mächtigkeit von 2.048 fordert, müssen Objekte mit mehr Punkten reduziert werden. Dies geschieht durch einen Farthest-Point-Sampling-Algorithmus gemäß Abbildung 3.

```

1: procedure FPS( $\{p_1, p_2, \dots, p_r \mid p_i = (x_i, y_i, z_i)^T \forall i \in \{1, \dots, r\}\}$ )
2:    $P \leftarrow \{1, 2, 3, \dots, r\}$                                 ▶ Input: Punktwolke
3:    $P' \leftarrow \emptyset$ 
4:   int i                                                    ▶ Geforderte Ganzzahligkeit
5:   int j
6:   int nextpoint
7:    $j = \text{generate\_random\_integer}(1, v)$                 ▶ Zufällige Zahl zwischen 1 und v
8:    $P = P \setminus \{j\}$                                     ▶ j aus P entfernen
9:    $P' = \{j\}$                                             ▶ j zu P' hinzufügen
10:  repeat
11:    nextpoint =  $\arg \max_{i \in P}, \min_{j \in P'} \|P_i - P_j\|$ 
12:     $P = P \setminus \{\text{nextpoint}\}$ 
13:     $P' = P' \cup \{\text{nextpoint}\}$ 
14:  until  $|P'| = 2048$                                      ▶ Wiederholen bis Punktzahl erreicht
15:  return  $P'$                                              ▶ Output: Menge der Positionen der reduzierten Punktwolke
16: end procedure
    
```

Abbildung 3: Farthest-Point-Sampling-Algorithmus

PointNet stellt im Rahmen der Veröffentlichung des Quellcodes eine Sammlung von implementierten Funktionen bereit, welche die für das Training des Klassifizierungsnetzwerkes notwendigen *.h5-Dateien schreibt und speichert. Das Labeln, das heißt die Zuweisung der Kategorie der Objekte, erfolgt manuell innerhalb des Codes. Die *.h5-Dateien bilden die Datengrundlage der Klassifizierung. Die softwareseitige Voraussetzung bildet dabei das trainierte neuronale Netz von PointNet. Die Klassifizierung der Objekte erfolgt dann auf Basis der Daten, die das Ergebnis des datengetriebenen Referenzprozesses sind.

Semantische Segmentierung

Der datengetriebene Referenzprozess für die semantische Segmentierung ist Abbildung 4 zu entnehmen.

Für die Entwicklung des datengetriebenen Referenzprozesses ist die Verfügbarkeit eines beispielhaften BIM-Modells eines gesamten Gebäudes notwendig. Vorliegend wurde das BIM-Modell des eigenen Institutsgebäudes verwendet. Die physische Austauschdatei besitzt das IFC-Dateiformat und ähnelt in dieser Hinsicht der Datenbasis des bereits erläuterten datengetriebenen Referenzprozesses der Klassifizierung.

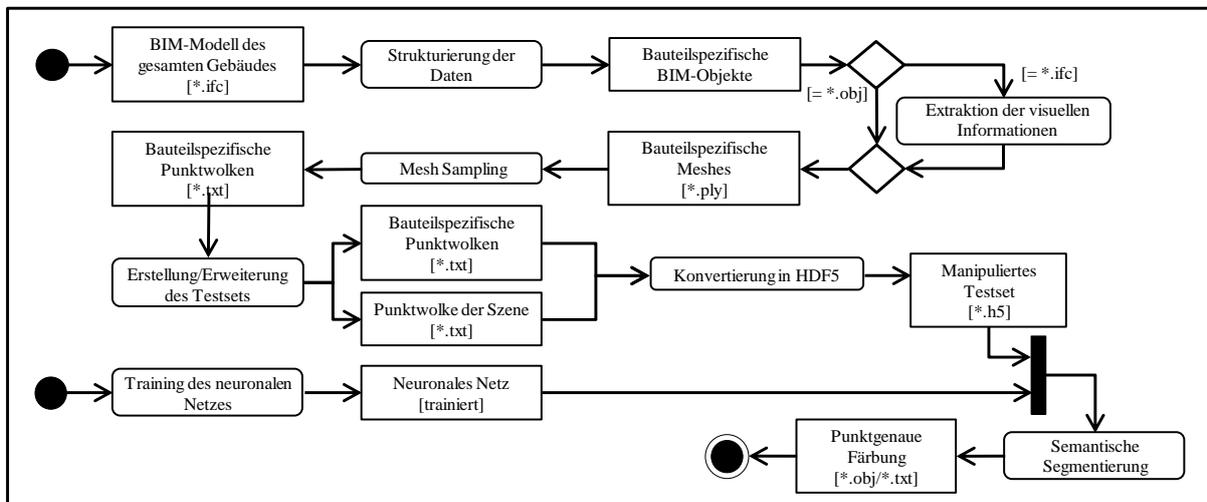


Abbildung 4: Datengetriebener Referenzprozess der semantischen Segmentierung als UML-Diagramm

Das neuronale Netz im Rahmen von PointNet kann Szenen, die einzelne Räume enthalten, semantisch segmentieren. Das gesamte Gebäudemodell muss daher in einzelne Räume untergliedert werden, die wiederum in ihre einzelnen Bestandteile aufgeteilt werden. Für diesen Vorgang wird die Software Desite MD Pro verwendet. Der beispielhafte Raum wird im Folgenden als Referenzszene bezeichnet. Nach der Identifikation der in der Referenzszene vorhandenen relevanten Bauteile werden diese einzeln durch die integrierte Exportfunktion von Desite MD abgespeichert. Die softwareseitig unterstützten und für den datengetriebenen Referenzprozess maßgebenden Dateiformate sind diesbezüglich das IFC- sowie das OBJ-Format. Das Ergebnis dieses Vorgangs sind getrennte *.obj-Dateien für jedes Bauteil der Szene.

Sollten einzelne Bauteile nicht, wie beim vorangegangenen Vorgang beschrieben, als *.obj-Datei vorliegen, wird die Extraktion der visuellen Information aus der *.ifc-Datei des relevanten Bauteils entsprechend des Klassifizierungsprozesses mit IFCConvert durchgeführt.

Das Mesh Sampling wird analog zur Klassifizierungsaufgabe getrennt für jedes Bauteil durchgeführt, allerdings ohne die Vorgabe hinsichtlich der Mächtigkeit der Punktwolke. Dies resultiert aus der Variabilität der Punkte bei der Aufnahme von Punktwolken durch Scanner in der Realität. Daher entfällt die optionale Anwendung eines Farthest-Point-Algorithmus auf die Punktwolken der relevanten Bauteile. Das Ergebnis dieses Vorgangs sind einzelne *.txt-Dateien, die jeweils die Punktwolke aller relevanten Bauteile der Szene enthalten.

Die Vereinigung der *.txt-Dateien aller relevanten Bauteile zuzüglich der nicht zuordenbaren Punkte (Clutter) bildet die Punktwolke des gesamten Raumes. Die Reihenfolge, in der die Bauteile der Datei hinzugefügt werden, spielt aufgrund der Eigenschaft einer Punktwolke hinsichtlich der Sortierung keine Rolle. Dieser Vorgang muss prinzipiell für jede Szene wiederholt werden. Die Dateien werden dann dem bereits bestehenden Testset des S3DIS-Datensatzes (Armeni et al. 2017) hinzugefügt. Die Benennung der entstehenden Dateien sowie die Ordnerstruktur erfolgt hierbei gemäß den Vorgaben durch PointNet. Das Ergebnis dieses Vorgangs sind die *.txt-Dateien aller relevanten Bauteile sowie der gesamten Szene.

Im nächsten Schritt wird eine Formatkonvertierung in HDF5 durch zwei implementierte Transformationsvorgänge durchgeführt. Dazu wird die strukturierte Szene dem ursprünglichen Testset hinzugefügt und die Transformation auf diesen manipulierten Datensatz angewendet. Bei der Erstellung bzw. der Erweiterung des Testsets ist es entscheidend, die Dateinamenskennung von PointNet beizubehalten. Die Dateinamen werden im

Rahmen der HDF5-Konvertierung für das Labeln eines jeden Punktes verwendet. Das händische Labeln der Punkte der gesamten Szene wäre mit einem unverhältnismäßigen Aufwand verbunden. Die Szene ist nun final für die semantische Segmentierung durch das Netzwerk vorbereitet. Diese erfolgt dann auf Basis der Daten, die das Ergebnis des datengetriebenen Referenzprozesses sind.

ERGEBNISSE

Klassifizierung

Die beispielhafte Objektkategorie muss bereits im ModelNet40-Datensatz enthalten sein und in den Gesamtkontext des Gebäudes eingebettet werden können, da dieser Datensatz zum Training des Netzwerkes verwendet wurde. Das Referenzobjekt für die Klassifizierung ist vorliegend ein Stuhl.

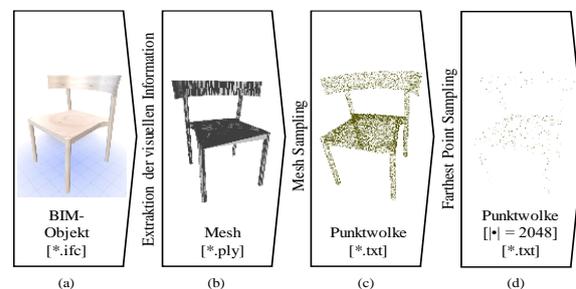


Abbildung 5: Ergebnisse des Referenzprozesses der Klassifizierung

Abbildung 5 (a) zeigt das Referenzobjekt in der Downloadmaske der ausgewählten BIM-Objektdatenbank. Gespeichert wurden die Objekte als Industry Foundation Classes. Die *.ifc-Dateien selbst sind in ihrer reinen Textform nicht anschaulich, weshalb an dieser Stelle auf eine Visualisierung verzichtet wird. Mit Hilfe des Tools IFCConvert der Open Source Softwarebibliothek IFCOpenShell wurden dann die visuellen Informationen extrahiert und in einer *.ply-Datei abgespeichert. Das als Mesh visualisierte Ergebnis ist Abbildung 5 (b) zu entnehmen. Der implementierte Mesh-Sampling-Algorithmus, der auf der Bibliothek PyntCloud basiert, transformiert die gegebenen Meshes in Punktwolken. Durch Parameter kann gesteuert werden, wie viele Punkte erzeugt werden sollen. Das Ergebnis ist Abbildung 5 (c) zu entnehmen. Liegen die Punktwolken nicht mit der benötigten Mächtigkeit vor, so ist der Farthest-Point-Sampling-Algorithmus zu verwenden. Das Ergebnis ist in Abbildung 5 (d) dargestellt. Das Netzwerk klassifiziert das Referenzobjekte mit einer dem Netzwerk angemessenen Genauigkeit. Die korrekt vorausgesagte sowie tatsächliche Objektkategorie werden während der Evaluierung in einer *.txt-Datei gespeichert.

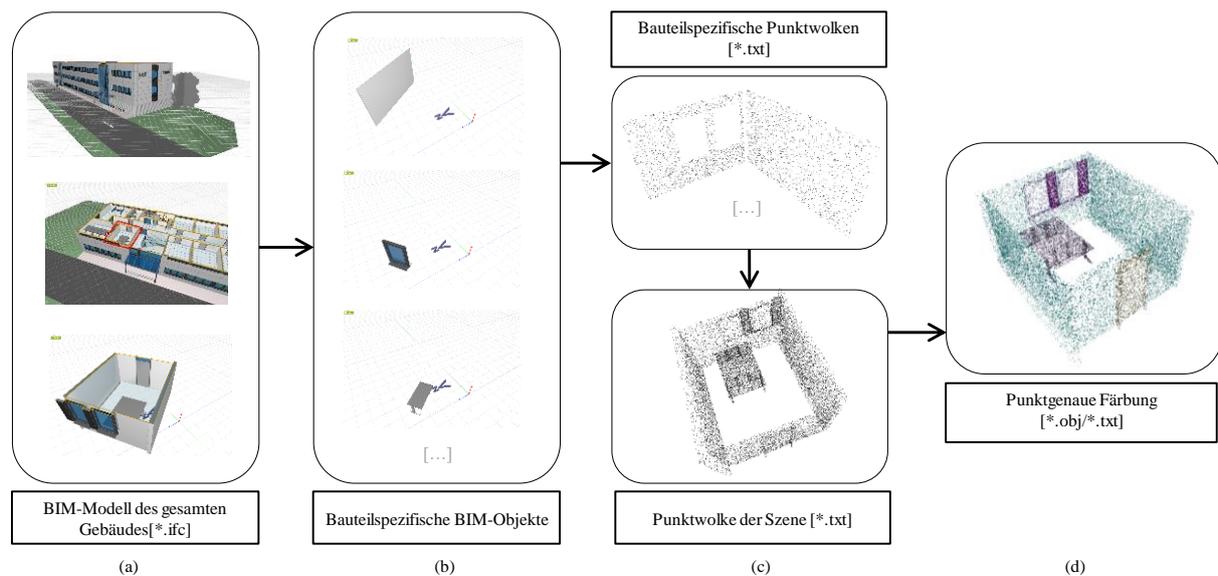


Abbildung 6: Ergebnisse des Referenzprozesses der semantischen Segmentierung

Semantische Segmentierung

Abbildung 6 (a) zeigt die Visualisierung des gesamten BIM-Modells von außen mittels der Software Desite MD Pro auf Grundlage der *.ifc-Datei, den Raum gemäß der Markierung im Kontext des Gebäudes sowie den aus dem Gesamtmodell extrahierten Raum, der die Grundlage für den weiteren Prozess darstellt. Dieser Raum wurde dann entsprechend in die einzelnen Bauteile aufgeteilt. Die Darstellung ausgewählter Bauteile in Desite MD Pro ist Abbildung 6 (b) zu entnehmen. Die einzelnen Bauteile wurden dann durch den bereits implementierten Abtast-Algorithmus in Punktwolken transformiert. Die Punktwolken der einzelnen Bauteile der Referenzszenen wurden in beliebiger Reihenfolge in einer *.txt-Datei zusammengefasst. Das visualisierte Ergebnis dieser Zusammenfassung ist Abbildung 6 (c) zu entnehmen. Das Netzwerk segmentiert die Referenzszenen mit einer dem Netzwerk angemessenen Genauigkeit. Die semantische Segmentierung jeder Szene wird durch die Färbung der einzelnen Punkte visualisiert und gespeichert. Abbildung 6 (d) zeigt die semantische Segmentierung der Referenzszenen.

LIMITATIONEN

Der datengetriebene Referenzprozess ist durch die Qualität des Objekterkennungssystems limitiert. Obwohl PointNet zu den akkuratesten Systemen bei der Objekterkennung auf Punktwolken-Ebene gehört, kann noch immer keine vollkommene Genauigkeit erzielt werden. Das bedeutet, dass nicht jedes Objekt fehlerfrei klassifiziert und nicht jede Szene fehlerfrei semantisch segmentiert werden kann. Eine händische Nachbearbeitung der identifizierten Falschklassifizierungen kann zum aktuellen Zeitpunkt nicht verhindert werden und kann mit einem Mehraufwand verbunden sein. Bei der Klassifizierung

betrifft dies rund 10 % der Objekte und bei der semantischen Segmentierung rund 20 % aller Punkte. Die Möglichkeit einer Vernachlässigung der Falschklassifizierungen kann immer im jeweiligen Anwendungsfall hinsichtlich der angemessenen Toleranzen geprüft werden.

3D-Repräsentationen eines Gebäudes, die durch das vorliegende Modell verarbeitet werden, sind Gebäudedatenmodelle und Punktwolken. Diese beiden Repräsentationen sind in ihrer Struktur und hinsichtlich der notwendigen Verarbeitung vollkommen konträr. Das Objekterkennungssystem ist zum aktuellen Zeitpunkt durch diese Konträrheit limitiert. Konkretisiert sind Gebäudedatenmodelle im Rahmen der Planung eine synthetische Abstraktion des realen Bauwerks aus dem Gedankengut der Beteiligten, wohingegen Punktwolken direkt aus dem existierenden Bauwerk generiert werden. Sowohl ein Gebäudedatenmodell als auch eine Punktwolke enthalten immer Ungenauigkeiten. Im vorliegenden Fall sind im BIM-Modell, aus dem die Referenzszenen stammen, beispielsweise nur synthetische Farbinformationen gespeichert. Anders verhält es sich bei den für das Training verwendeten Punktwolken, die eine realitätsnahe Farbinformation unter Berücksichtigung der Lichtverhältnisse für jeden einzelnen Punkt enthalten. Außerdem konnten in der Referenzszenen weder eine Decke noch ein Boden als Bauteil identifiziert werden. Der Grund dafür ist die etagenübergreifende Modellierung des horizontalen Raumabschlusses im Rahmen von BIM. Dieser liegt somit nicht raumspezifisch vor. Bei der Aufnahme der Punktwolke im realen Gebäude wird der horizontale Raumabschluss augenscheinlich durch den vertikalen Raumabschluss, also die Wände, begrenzt.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das vorliegende Paper zeigt, dass es möglich ist, die zentralen dreidimensionalen Repräsentationen eines Gebäudes innerhalb eines KI-basierten Objekterkennungssystem zu verarbeiten. Zu den zentralen Repräsentationen von Gebäuden gehören dreidimensionalen Gebäudedatenmodellen sowie in der Realität aufgenommenen Punktwolken. Das Modell ermöglicht somit die Verknüpfung von visuellen Daten des Planungsprozesses mit denen der As-Built-Dokumentation von Gebäuden. Dazu werden die BIM-Daten derart transformiert, dass sie in ein für Punktwolken konzeptioniertes Objekterkennungssystem eingespeist und korrekt verarbeitet werden können.

Dies ermöglicht beispielsweise die Erweiterung von Trainingsdaten für ein neuronales Netzwerk. Die Objekterkennung im Bestand von Gebäuden kann auf alle Gewerke ausgeweitet werden, für die ausreichend BIM-Objekte vorhanden sind. Dies betrifft insbesondere das Gewerk der technischen Gebäudeausrüstung, für das zum aktuellen Zeitpunkt keine umfassenden Datensätze vorhanden sind. Ein derartiges Objekterkennungssystem bietet Potenziale für die generelle Weiterentwicklung des Indoor Scene Understanding, das heißt einem computergestützten Verständnis des Interieurs von Gebäuden und Räumen. Außerdem kann die Objekterkennung hinsichtlich der Problematik von Intraklassen-Variationen sowie der Größe des benötigten Datensatzes durch ein möglichst heterogenes Trainingsset verbessert werden. Vorausgesetzt, das neuronale Netzwerk wird mit den BIM-Daten eines Gebäudes trainiert und eine aufgenommene Punktwolke des gleichen Gebäudes soll im Anschluss semantisch segmentiert bzw. die enthaltenen Objekte klassifiziert werden. Dann resultiert aus dem datengetriebenen Referenzprozess die Hypothese, dass die Ergebnisse der Objekterkennung hinsichtlich der Genauigkeit besser werden, da das neuronale Netz auf ähnlichen Daten trainiert wurde.

Eine weitere Herausforderung der allgemeinen Objekterkennung ist die zumindest teilweise Verdeckung der Objekte durch nahe gelegene bzw. perspektivenabhängige andere Objekte. Durch das BIM-Modell eines Gebäudes ist allerdings der gesamte Kontext bekannt. Für Unternehmen mit einem entsprechenden Bestand an Immobilien kann ferner das Datenmanagement vereinfacht und somit die Produktivität gesteigert werden. Der KI-basierte Ansatz ermöglicht außerdem eine neue Herangehensweise an das Forschungsgebiet der BIM As-Built-Dokumentation.

Zukünftige Forschungsarbeiten müssen beispielsweise die datengetriebene Referenzprozesse automatisieren, um so eine praktische Anwendungsfähigkeit zu erreichen. Ferner sollte evaluiert werden, ob die Qualität der Objekterkennung steigt, wenn das Netzwerk zuvor mit den BIM-Daten des gleichen Gebäudes trainiert wurde. Dann könnten

aufgrund der Reduzierung der Intraklassen-Variation weniger Daten für das Training des Netzwerkes notwendig sein.

LITERATUR

- Accenture Strategy 2016. Digitalisierung entzaubern – wie die deutschen Top500 digitale Blockaden lösen.
https://www.accenture.com/_acnmedia/PDF-5/Accenture-Top500-DE-Executive-Summary-Final-Web.pdf. Accessed: 2020-04-04.
- Achlioptas, P., Diamanti, O., Mitliagkas, I., and Guibas, L. 2017. Learning representations and generative models for 3d point clouds.
- Angelina Uy, M. and Hee Lee, G. 2018. Pointnetvlad: Deep point cloud based retrieval for large-scale place recognition. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pages 4470–4479.
- Armeni, I., Sax, A., Zamir, A. R., and Savarese, S. 2017. Joint 2d-3d-semantic data for indoor scene understanding.
- BMWi 2018. Den digitalen Wandel gestalten.
<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/digitalisierung.html>.
 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Accessed: 2020-04-04.
- Borrmann, A., König, M., Koch, C., and Beetz, J. 2015. Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis. Springer-Verlag.
- Boscaini, D., Masci, J., Melzi, S., Bronstein, M. M., Castellani, U., and Vandergheynst, P. 2015. Learning class-specific descriptors for deformable shapes using localized spectral convolutional networks. In Computer Graphics Forum, volume 34-5, pages 13–23. Wiley Online Library.
- Brock, A., Lim, T., Ritchie, J. M., and Weston, N. 2016. Generative and discriminative voxel modeling with convolutional neural networks.
- buildingSMART. 2020. IFC 4.1 Specification.
https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4_1/FINAL/HTML/.
- Cheraghian, A. and Petersson, L. 2019. 3dcapsule: Extending the capsule architecture to classify 3d point clouds. In 2019 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV), pages 1194–1202.
- Dominguez, M., Dhamdhere, R., Petkar, A., Jain, S., Sah, S., and Ptucha, R. 2018. General-purpose deep point cloud feature extractor. In 2018 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV), pages 1972–1981.
- Goodfellow, I., Bengio, Y., and Courville, A. 2016. Deep Learning. MIT Press.

- Han, Z., Liu, Z., Vong, C.-M., Liu, Y.-S., Bu, S., Han, J., and Chen, C. P. 2018. Deep spatiality: Unsupervised learning of spatially-enhanced global and local 3d features by deep neural network with coupled softmax. *IEEE Transactions on Image Processing*, 27(6):3049–3063.
- Han, Z., Lu, H., Liu, Z., Vong, C.-M., Liua, Y.-S., Zwicker, M., Han, J., and Chen, C. P. 2019. 3d2seqviews: Aggregating sequential views for 3d global feature learning by cnn with hierarchical attention aggregation. *IEEE Transactions on Image Processing*.
- Hausknecht, K. and Liebich, T. 2016. BIMKompodium. Building Information Modeling als neue Planungsmethode. Stuttgart.
- Hichri, N., Stefani, C., De Luca, L., and Veron, P. 2013. Review of the “as-built bim” approaches. *Proceedings of the 3D-ARCH International Conference*.
- IDC 2018. The digitization of the world from edge to core. <https://www.seagate.com/files/www-content/our-story/trends/files/idc-seagate-dataage-whitepaper.pdf>. International Data Corporation sponsored by Seagate, Accessed: 2020-04-04.
- ISO 16379. 2013. Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries. International Organisation for Standardisation.
- Krijnen, T. 2012. An open source IFC-geometry engine.
- Li, J., Chen, B. M., and Hee Lee, G. 2018. So-net: Self-organizing network for point cloud analysis. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pages 9397–9406.
- Liu, X., Han, Z., Liu, Y.-S., and Zwicker, M. 2019. Point2sequence: Learning the shape representation of 3d point clouds with an attention-based sequence to sequence network. In *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, volume 33, pages 8778–8785.
- Maturana, D. and Scherer, S. 2015. Voxnet: A 3d convolutional neural network for real-time object recognition. In *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 922–928.
- Qi, C. R., Su, H., Mo, K., and Guibas, L. J. 2017a. Pointnet: Deep learning on point sets for 3d classification and segmentation. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 652–660.
- Qi, C. R., Yi, L., Su, H., and Guibas, L. J. 2017b. Pointnet++: Deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space. In *Advances in neural information processing systems*, pages 5099–5108.
- Ravanbakhsh, S., Schneider, J., and Poczos, B. 2016. Deep learning with sets and point clouds.
- Sedaghat, N., Zolfaghari, M., Amiri, E., and Brox, T. 2016. Orientation-boosted voxel nets for 3d object recognition.
- Su, H., Maji, S., Kalogerakis, E., and Learned-Miller, E. 2015. Multiview convolutional neural networks for 3d shape recognition. In *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, pages 945–953.
- Stübe, H. and Rodner, E. 2014. Bildverarbeitung und Objekterkennung.
- van Treeck, C., Elixmann, R., Rudat, K., Hiller, S., Herkel, S., and Berger, M. 2016. Gebäude. Technik. Digital.: Building Information Modeling.
- Wang, C., Samari B., and Siddiqi, K. 2018. Local spectral graph convolution for point set feature learning. In *Proceedings of the European conference on Computer Vision (ECCV)*, pages 52–66.
- Wang, Y., Sun, Y., Liu, Z., Sarma, S.E., Bronstein, M.M. and Solomon, J.M. 2019. Dynamic graph cnn for learning on point clouds. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 38(5), 1-12.
- Wu, Z., Song, S., Khosla, A., Yu, F., Zhang, L., Tang, X., and Xiao, J. 2015. 3d shapenets: A deep representation for volumetric shapes. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pages 1912–1920.
- Xu, Y., Fan, T., Xu, M., Zeng, L., and Qiao, Y. 2018. Spidercnn: Deep learning on point sets with parameterized convolutional filters. In *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*, pages 87–102

XV: Lifecycle-oriented modelling and usability

FACILITATING BUILDINGS' LIFE CYCLE ASSESSMENT THROUGH FLEXIBLE LCA TOOLS

O. Jorgji¹, R. Di Bari^{1,2}, R. Horn^{1,2} and D. Chuchra^{1,2}

¹Institute for Acoustics and Building Physics, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany

²Fraunhofer IBP, Stuttgart, Germany

ABSTRACT

Several SBA (Sustainability Building Assessment) tools exist for the environmental impact assessment in the building sector. Since the majority support either certification or early design, they cannot facilitate the optimization potential of integrated SBA.

This publication presents the novel tool GENERIS®, which offers improved functions for buildings' Life Cycle Assessment, with focus towards BIM integration of LCA. An XSD-LCA scheme stages the data transfer of BIM models based on IFC4x2 standard to Generis®. Fragmentation of a building model in different LoDs and the automation of LCA through standard constructions is described. LCA follows in every phase of the planning process.

INTRODUCTION (LCA STATE OF ART)

Buildings share 19% of global total final consumption and 40% of resource waste, leading to environmental degradation, yet holding a high potential for contributing to GHG emissions-reduce. Due to their life span, the pollution they generate can have long lasting effects on the climate. Inefficiencies caused by unsuitable decisions can be related to the so far applied materials and technologies as well as the whole construction process itself. This complex living system includes several influencing actors, a large number of stakeholders and decisions that need to be monitored and coordinated.

If the environmental impacts taking place during different processes in the building sector are not monitored from beginning to end, undesirable usage patterns are created, which affect not only the users' quality of life but also act as a basis for wrong repeated decisions in the generations to come (UN-Habitat, 2017).

In order to achieve a holistically sustainable building design, expertise on environmental assessment has to be offered to stakeholders in order to reduce, e.g. the life-cycle-related GHG emissions of buildings. This occurs for instance by optimizing embodied emission investments for new construction or, in existing buildings, by promoting 'carbon-effective' investments for the refurbishment (Röck et al., 2020).

Environmentally aware decision-making is feasible with benchmarking and assessment tools for calculating the environmental profile of buildings and their components. Such instruments should not only be exploited on the conclusion of building design (in the business-as-usual scenario) but should be also included in the early decision-making and then in-depth over the whole planning process (Di Bari et al., 2019). Furthermore, they can also contribute to the creation of a common sustainability language for all the involved parties and reinforce collaboration between stakeholders already in the early design stages (UN-Habitat, 2017) (Battisti et al., 2019). Under these conditions, a number of sustainability assessment and benchmarking systems have been developed the last three decades starting from 1990 when BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) was introduced in the UK, as a first generation sustainability assessment tool. A number of labelling systems followed after: HQE (High quality of Environment), LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), GREEN STAR, CASBEE (Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency). The second-generation assessment methods such as DGNB (German Certificate for Sustainable Buildings) and LEnSE (Label for Environmental, Social and Economic buildings) were developed much later starting in the year 2008 (Markelj et al., 2013). The large interest of stakeholders on such instruments can be confirmed from the high number of certification submissions and requests (DGNB¹). An environmental building labelling leads to less efforts of planners, increases market opportunities for owners and investors and certifies a higher living quality for users (DGNB²). 37 international and 64 European "qualitative assessment methods" were identified and significant differences were found out in these tools in regards to the assessment scheme they are based on. Each of the schemes puts a different value on the three sustainability pillars: social, environmental and economic; an equal weight is given to each pillar only in the DGNB system. Unlike first generation methods, the newest ones are more precise and demanding since the assessment includes LCA and Life Cycle Costing (LCC) analyses. (OPEN HOUSE, 2013)

With regard to the environmental quality, LCA analyses based on European standards EN15804 – EN15898, are the only legitimated for buildings and building products (Passer et al., 2015).

The modelling and the Life Cycle Impact Assessment (LCIA) can be carried out by different specialized commercial software (e.g. SimaPro, GaBi) or open-source (openLCA). While such tools are useful and applied for products and services analyses in the building sector, they are not widely used by planners and architects because of the variety of materials and processes to be included into LCA models. For these reasons, alternative tools have tried to solve this gap through specializing on sustainability building analyses.

One of the challenges in the field of building LCA is its inclusion in an integrated planning process, where several actors have to be coordinated, and digitalization e.g. through Building Information Modelling (BIM) takes place. Both constitute a strategy that optimizes the whole planning process in terms of time, effort and budget, but leads to issues caused by communication between different actors and multitude of interfaces that cannot always easily exchange information (Di Bari et al., 2019).

That is why more standardized formats have been proposed and in this context, the IFC format was introduced from buildingSMART as a neutral and open specification for BIM.

The greatest vendor firms of software products are pushing towards cloud services and consequently web-based interfaces, since through model management on cloud each project team-member can easily access the model for changes and updates irrespective of their location. The cloud platform is considered the future of interoperability and collaboration that is why the use of a unified modelling language for BIM is of fundamental relevance (Amoah et al., 2019).

This paper describes a workflow conceived for data exchange between a BIM model and an SBA tool. The data structure in XSD format (XML Schema Definition) is afterwards applied in the web-based tool Generis® and enables communication between the 3D model and LCA model in order to derive environmental information in a more automated way through an Extensible Markup Language (XML)-document. As advantage, this structure allows environmental feedback on building design already in the early planning phases. Lastly, the derived LCA information can be directly submitted for e.g. a DGNB building certificate (Generis®-solution.eu).

STATE-OF-TECHNIQUE

Building assessment methods are supported by various software tools which exist in the market as web-tools or as offline installable software. In the global context, they entered into the picture shortly after the introduction of the LCA and they continued to develop alongside the progress of LCA methodology. Since they can be used both for the comparison of design alternatives and for the evaluation of environmental performance for certification purposes, they use different data and calculation rules.

Hereafter a review is presented. This is not meant to be exhaustive and is based on the reports provided by tools developers. In Table 1, the main features are grouped in categories (database, data format, building type, certification and extended functions).

Building assessment tools in the German context

In the German context, the first tool LEGEP was developed in 1997-2000 as a DBU funded project. This offline installable software created from Weka Media has seven modules which take into consideration different aspects of the planning process from the construction alternatives to the cost planning and energy certificates. The module *Ökobilanz* offers the possibility to model precise constructions and technical installations based on sirAdos building data. The LCIA calculation gives results on the building level based on *Ökobau.dat* and *ecoinvent* databases. LEGEP exports the results in data formats compliant with AVA (Tendering, Contracting and Accounting) interfaces and Excel-spreadsheets. In the module *Certification* the users are able to get submission-ready documentation for their building, in compliance to German systems (DGNB, BNB, NaWoh) and the Austrian ÖGNI certification system (LEGEP report, 2010)

Ökobilanz-Bau.de-tool was developed in 2010-2011 from HOINKA GmbH. The workflow starts with processes from *Ökobau.dat*, moves on to modeling of products and the grouping of elements follows it. The environmental impact analysis can be carried out for individual elements as well as for whole cost groups according to DIN 276. Results for the elements are exported in PDF, and the summary of processes from the database in Excel. Through an interface between *Bim2Sim* tool and *Ökobilanz-Bau* it is possible to carry out environmental analysis for imported BIM models in IFC (*ökobilanz-bau* Report, 2016).

The second documented tool *eLCA* was developed in 2012 from Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR/ Research on Building, Urban Affairs and Spatial Development) for the life cycle assessment of office and administration buildings. The tool is web-based and exploits the XML markup language. As advantage, direct link to the BNB certification submission is offered through the XML-

export. Layers, constructions or complete building assessment are based on Ökobau.dat datasets and visualized through dynamic graphs (eLCA Report, 2014).

Lastly, we mention CAALA, developed in 2016-2018 as an offline software. The applied database is Ökobau.dat but the tool allows also the import of own

EPDs. It provides besides data for submission according to German systems (DGNB, BNB, and BNK), a CAALA-plugin which performs import of sketchup and Rhino models for parametric LCA. Results can be exported in PDF, gbXML, Excel format and in eLCA data format for direct submission to the BNB certification (CAALA website).

Table 1: Characteristics of SBA tools in the German building sector

N°	TOOL	DEVELOPER	DATABASE	DATA FORMAT	BUILDING TYPE	CERTIFICATION	EXTENDED FUNCTIONS
1	LEGEP	WEKA MEDIA	Ökobau.dat Ecoinvent	AVA Programs RTF	Not defined (presumably all)	BNB, DGNB, NaWoh, ÖGNI	-Structure based on HOAI Integral Planning -offers cost calculation & planning
2	eLCA	BBSR	Ökobau.dat	XML xlsx CSV	Office Administrati on	BNB	Direct submission for BNB certification
3	Oekobilanz- bau	HOINKA GmbH	Ökobau.dat	PDF xlsx	Not defined (presumably all)	DGNB, LEED, BREEAM	BIM integration - IFC model, interface with Bim2Sim
4	CAALA	CAALA	Ökobau.dat own EPDs	PDF gbXML eLCA- format (XML) Excel	Not defined (presumably all)	DGNB, BNB, BNK	CAD and BIM integration – plug-in for sketchup and Rhino models
5	SBS -> GENERIS®	FRAUNH OFER IBP	Ökobau.dat ESUCO	Excel	All	DGNB, BNB, NaWoh, BNK, BREEAM	Display of results in DGNB template ready for certification

SBA tools – Comparison

According to the review in the previous section, most of SBA tools are suitable within the German building sector, since they use Ökobau.dat database for the environmental performance, with few exceptions whereas EPDs can be considered. The data export format also differs; each one of them offers different possibilities of exporting results. Nevertheless, they all offer export in spreadsheet files allowing flexibility on further data use through the conversion of Excel to other data formats. In most tools, there is no definition of the allowed building types for modeling, with the exception of eLCA, which addresses only office and administration buildings. Even if the building modelling for LCA analysis is anyway possible, due to the missing reference to all user profiles for building certifications, a final evaluation cannot always be carried out, leading to miscalculations of the final points. All tools allow the preparation of results in data templates in compliance to certification systems. Except from eLCA, all of the reviewed tools base the environmental performance on DGNB criteria and depending on the building type. Some of them

(LEGEP, CAALA, SBS) offer BNB certification for non-residential buildings as well.

The tools have different extended functionalities that make them unique from each other. Nevertheless, depending on the target audience, where one tool covers the gaps of another, it lacks in a functionality that the other tool offers.

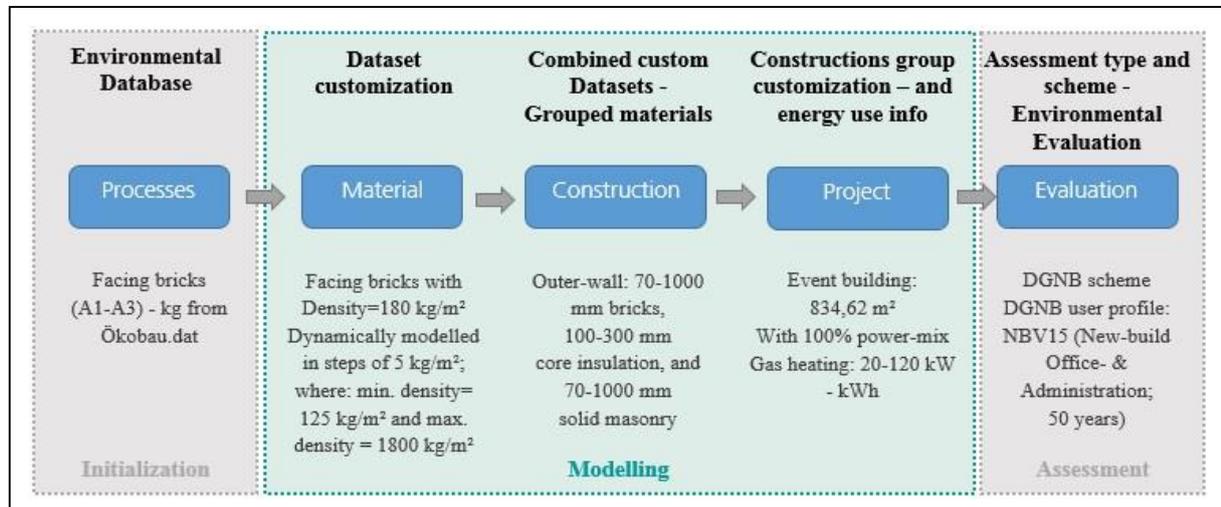
Challenges of SBA tools

Due to the need to address gaps in existing assessment and benchmarking tools, the increase in number of the SBA tools leads to repetitions and overlapping. From the LCA perspective, challenges such as range of chosen indicators and credibility of “green labelling”, weighting of indicators, reliability of data, user friendliness, performance differences, costs, adaptability to regional contexts are greatly affecting the comprehensiveness of SBA tools (UN-Habitat, 2017). These variations are resulting mainly due to differences between countries related to the goals for environmental enhancement in the building sector. On the other hand, from the perspective of planners and the Architecture Engineering Construction (AEC)

industry, the main concern lies in the existence of ineffective information during data exchange, and/or problems due to insufficient data description of Exchange Requirements (VDI 2552 Blatt 11 BIM-Information exchange). This can lead to three major

problems: costly errors in design/ construction, time wasting in making decisions and a missing achievement of the best technical building requirements due to poor judgment (Nguyen et al., 2019).

Figure 1
GENERIS® solution approach for building evaluation



As noticed in Table 1, common denominator of the newest tools is the tendency to reach integrated life cycle assessment into 3-dimensional models and vice-versa. In this regard, the implementation of LCA information in the automation and digitalization (BIM) of building construction offers a fundamental solution. The structure of LCA information in defined LoDs (Level of Development), i.e. material, sub-elements, building elements and building (Röck et al. 2018) and attached to the relevant phases of the Integral Planning (IP), as determined in Germany from the Honorarium Code for architects and engineers (HOAI), gives a plausible solution to the planning process of sustainable buildings (Gantner et al., 2018).

SOLUTION APPROACH

General characteristics of Generis®

Generis® is a sustainability assessment tool developed on the structure of the former SBS web-tool of Fraunhofer IBP, with new functions and improved features. The user has the possibility to model based on the German environmental database Ökobau.dat and the European database ESUCO. The LCA methodology is based on ISO 14040/ 14044 EN15804 EN15898 standards and the predefined designs are based on the DIN EN 18599 design catalog. A three-hierarchical framework is established and three LoDs distinguished (see Figure 1).

- **Process:** i.e. a database entry and the basis for evaluations consisting of building materials, construction, transport, energy and disposal processes
- **Construction:** Group of layers. defined according to DIN 276 cost groups and the

respective reference units (e.g.: m² for external walls)

- **Project:** Group of constructions. Further specifications about operational stage, such as electricity and heating consumption, photovoltaics credits are input.

Along modeling the buildings' geometry and dimensions assignment, the user can also enter costs information for the LCC analysis and cost planning. Environmental performance results can be displayed in different assessment schemes in the same quality regardless of the modeling process. Results are downloaded as XLSX or HTML file format. The tool also offers direct export of Excel to DGNB submission.

Modelling in Generis®

There are two workflows for modeling in Generis®.

- **Scenario A:** information on buildings' geometry and constructions, energy standard and building type is provided beforehand. The user aims to carry out a final assessment ready for certification submission.
- **Scenario B:** Environmental impact results of potential solutions need to be assessed in different design stages for decision support. Existing constructions from catalogs can be applied in this case.

In both cases, modelling starts by choosing the environmental database. Afterwards, in case of Scenario A the user sets up a *Project* through the assignment of processes. The user, groups the selected processes in a construction and edits them to suit the aimed dimensions, functional unit, and end-of-life routes. If the user is looking for environmental feedbacks for decision-making (Scenario B), he can access a list of predefined constructions of building components.

Chosen processes from the database correspond to the material or technical component relevant for the construction. Processes are linked directly to the Ökobau.dat datasets. Constructions can be chosen from the available catalogs (Fraunhofer IBP, Open House, own data) in the Generis® database or can be modeled from the user. Each construction is assigned to the respective cost group (DIN 276). The constructions level includes buildings' elements, which shape its structure (walls, ceilings, etc.), as well as technical components (heat pump, PV collectors, etc.) A new feature that Generis® offers is the dynamic modeling on the layers level: dimensions are given in maximum and minimum value with defined steps progression. This enables to analyze the variations on environmental impact of different thickness configurations. Customized constructions are then grouped as a list in the Project level and attached with information on electricity and heat demand, as well as energy production and supply system.

XSD for LCA information request

In order to integrate LCA information in the digitalized automatized process of buildings' planning, Generis® has developed an interface for BIM integration. In collaboration with buildingSMART within the BIM2LCA4IP project, an XML/ XSD schema has been conceived for the interconnection between LCA methodology and BIM, based on IFC standard (Ebertshäuser et al, 2019). According to buildingSMART-user handbook for BIM-IFC data exchange published in 2008, free flow process is realized by three factors (buildingSMART-IFC user handbook, 2006):

- a standardized understanding of what the exchanged information actually is, i.e. Industry Foundation Classes (IFC);
- the format for the IFC information exchange (e.g. xml);
- a specification of which information has to be exchanged and when over the planning process, i.e. Information Delivery Modelling (IDM).

An important step in the transfer process of the BIM model information to the LCA-XSD is the Bill of Quantities (BOQ) which contains a list of all geometric constructions, elements and materials as well as their respective dimensions and quantities. The BOQ is extracted from BIM-software in the form of a

spreadsheet and transferred to the SBA tool, which carries out the life cycle assessment (Wastiels et al., 2019).

The LCA-XSD is developed together with a DGNB-XSD in order to enable the linking of life cycle data with the DGNB certification system for direct submission. In the LCA-DGNB-XSD, the information contains three LoDs, which correspond consistently to the modeling levels in Generis®. Application of the information transfer is described in the case study.

CASE STUDY

The selected building model for the application of the method is the "office building" designed from the Institute for Automation and Applied Informatics of Karlsruhe Institute of Technology (KIT) in the ARCHICAD software. This model is available on the internet free of charge as an IFC file (Figures 2-3). The model has four floors including basement. Main areas and volume are listed in Table 2.

Table 2:
Building areas and volume (www.ifcwiki.org)

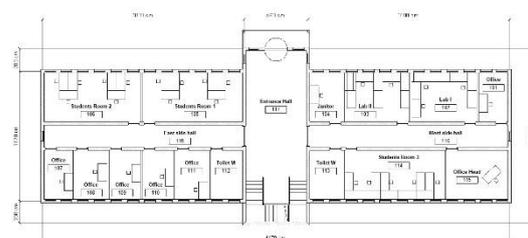
definition	Quantity	Unit
NFA	1790,74	m ²
GFA	2066,2	m ²
GV	769,98	m ³

The information on the building model is not changed or edited, since the focus of this paper is to demonstrate how the LCA information is bundled into the information on building's geometry coming from IFC file, through the XML-structure. This means that information on the structure composition, U-Values of the construction parts as well as the relevant information for the EnEV standard is taken as default and not optimized.

Figure 2:
Selected BIM model - 3D view and ground floor
(www.ifcwiki.org)



Figure 3:
Selected BIM model - ground floor (www.ifcwiki.org)



Application of XSD scheme

The LCA-XSD scheme begins with the xsd-element “project” corresponding to Project level in Generis®, which requests information from the BIM model. The information on title, id, description and lifespan is entered from the user as a free text. The settings of LCA are defined in Generis®, and the information on construction and lifecycle are assigned in the separate extended elements (xsd-complex types). Information of the case study is entered in the following element:

```
<lca:project>
  <title>BAUSIM_CaseStudy</title>
  <title>BS_001</title>
  <description>office_building</description>
  <lca:settings/>
  <lifespan>50</lifespan>
  <construction/>
  <lifecycle/>
</lca:project>
```

Information on constructions is further specified in the xsd-element “construction”, and corresponds to the construction level in Generis®. The required data for constructions is structured based on the modeling workflow in Generis®. The information input for the outer-wall construction of the case study is shown below:

```
<constructions>
  <lca:construction>
    <name>Außenwand_Kalksandstein</name>
    <description>Erdgeschoss_Kalksandstein_Verputz_weiß</description>
    <tags>DIN276: 300, 330</tags>
    <quantity>31,05</quantity>
    <unit>m2</unit>
    <lifespan>50</lifespan>
    <dynamic>>false</dynamic>
    <lifecycle/>
    <parts/>
  </lca:construction>
</constructions>
```

With respect to materials/ layers level in Generis®, the xsd-element “part” requires the information on each layer of the given construction from the BIM-model next:

```
<lca:part>
  <shortname>Kalksandstein</shortname>
  <quantity>31,05</quantity>
  <unit>m2</unit>
  <dynamic>>false</dynamic>
  <factorToDisposal>1,8</factorToDisposal>
  <lifespan>50</lifespan>
  <lifecycle/>
</lca:part>
<lca:part>
  <shortname>Gipsputz</shortname>
  <quantity>31,05</quantity>
  <unit>m2</unit>
```

```
<dynamic>>false</dynamic>
<factorToDisposal>1,0</factorToDisposal>
<lifespan>30</lifespan>
<lifecycle/>
```

```
</lca:part>
```

In the xsd-element “lifecycle”, the relevant information for the generation of environmental profiles of the BNK defined layer are extracted from environmental databases (Ökobau.dat/ ESUCO) through processes in Generis®.

```
<lifecycle>
<lca:lcddata>
  <lcphase>A1-A3; B4; C3-C4; D</lcphase>
  <lcphaseName>Construction, Replacement, Demolition, Credits</lcphaseName>
  <lca:lcphasedata>
    <Quantity>31,05</Quantity>
    <Unit>m2</Unit>
    <indicators>
      <lca:indicatordata>
        <indicatorName>Globales Erderwärmungspotenzial</indicatorName>
        <shortDescription>GWP</shortDescription>
        <exchangeDirection>out</exchangeDirection>
        <dynamic>>false</dynamic>
        <amount>3253.481</amount>
        <unit>kg CO2 eq.</unit>
      </lca:indicatordata>
    </indicators>
  </lca:lcphasedata>
```

```
</lca:lcddata>
```

```
</lifecycle>
```

Lastly, the input of detailed environmental impact data follows further through information-request of structured xsd-complex types, which for simplification purposes are not included in this paper.

OUTLOOK

The necessity of including environmental impact data in the design process has become essential related to the digitalization of the planning process. Most of SBA tools in the market are developing or have already developed in recent years with the focus of integrating LCA results within the IFC format, for enabling the interconnectedness of BIM-model information and life cycle assessment methodology. Nevertheless, this process is ongoing and faces continuously new challenges, forcing the developers to focus only on the BIM-integration problem. On the other hand, most of SBA tools address their service to limited groups of interest through offering specific functions.

This paper introduces Generis®, as a new SBA tool, which includes existing basic functions and presents especially a novel BIM improved interface. Through the implementation of the LCA-XSD scheme, which has been developed in BIM2LCA4IP, an ongoing research project, the compilation of a XML format has been carried out. This allows the import of BIM information to its modeling interface and a backup of different benchmarking schemes. The development of a joint DGNB-XSD interface enables the direct submission for DGNB certification.

The ongoing development of Generis® contemplates the improvement of workflows and increasing of assessment and exchange possibilities. As an SBA tool, it considers all aspects regarding the environmental quality of building. Environmental database update and enrichment with more innovative materials and components, is one of the main challenges. Furthermore, the creation and upload of new databases may enable automatic LCC or social assessment (S-LCA, LCWE) by achieving evaluation on a holistic perspective.

Within further ongoing projects, Generis® aims to achieve life cycle assessment on higher level, that of whole districts, by considering building groups and energy generation and supply systems. Lastly, with regard on LCA methodology, probabilistic ones will accompany dynamic assessments in order to provide more robustness to LCA results and aware support on decision making, during all the stages of planning and construction process.

ACKNOWLEDGEMENT

This publication has been supported by Fraunhofer Institute for Building Physics. Starting project BIM2LCA4IP funded by Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie), Grant FKZ: 03ET1466.

REFERENCES

- Amoah, E. K., Nguyen, T. V., 2019. Optimizing the Usage of Building Information Model (BIM) Interoperability Focusing on Data Not Tools, Florida Institute of Technology, Melbourne, FL USA
- Battisti, A., G. L. Persiani, S., Crespi, M., 2019. Review and Mapping of Parameters for the Early Stage Design of Adaptive Building Technologies through Life Cycle Assessment Tools, MDPI Article, energies
- CAALA: CAALA Alpha-Version 0.97, (www.caala.de), Munich, 2017
- Di Bari, R., Jorgji, O., Horn, R., Gantner, J., Ebertshäuser, S., 2019. Step-by-step implementation of BIM-LCA: A case study analysis associating defined construction phases with their respective environmental impacts. SBE19 Graz, Graz, Austria
- Deutsches Institut für Normung e. V. DIN, 2020. Sustainability of construction works- Environmental product declarations- Core rules for the product category of construction products, EN 15804:2012+A2:2019
- Deutsches Institut für Normung e. V. DIN, 2018. Energy efficiency of buildings- Calculation of the net, final and primary energy demand for heating, cooling, ventilation, domestic hot water and lighting- Part 11: Building automation. DIN V 18599-11
- Deutsches Institut für Normung e. V., 2009. Environmental management- Life cycle assessment- Principles and framework (ISO 14040:2006), EN ISO 14040:2006
- Deutsches Institut für Normung e. V., 2018. Environmental management- Life cycle assessment- Requirements and guidelines (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017), EN ISO 14044:2006 + A1:2008
- Deutsches Institut für Normung e. V., 2018. Building costs, DIN 276
- Ebertshäuser, S., Graf, K., Von Both, P., Di Bari, R., Horn, R., 2019. Sustainable Building Information modeling in the context fo model-based integral planning. SBE19 Graz
- Gantner, J., Von Both, P., Rexroth, K., Ebertshäuser, S., Horn, R., Jorgji, O., Schmid, C., Fischer, M., 2018. Ökobilanz-Integration in den Entwurfsprozess
- HOINKA GmbH, 2016. Kurzanleitung für die Ökobilanzierungs-Software oekobilanz-bau.de http://www.ifcwiki.org/index.php?title=KIT_IFC_Example
- <https://blog.dgnb.de/en/expo-real-2017/1>
- <https://www.dgnb-system.de/en/certification/benefits/index.php2>
- <https://www.buildingsmart.org/>
- IAI, buildingSMART-IFC user handbook, 2006.
- König, H., Mandl, W., 2010. LEGEP Software für eine Integrale Gebäudeplanung.
- Lode, T., Hartwig, J., Drexler, H., 2014. Online Ökobilanzierungstool eLCA, Abschlussbericht
- Markelj, J., Kitek Kuzman, M., Zbašnik-Senegačnik, M., 2013. A Review of Building Sustainability Assessment Methods, University of Ljubljana.
- Nguyen, T. V., Amoah, E. K., 2019. An Approach to Enhance Interoperability of Building Information Modeling (BIM) and Data Exchange in Integrated Building Design and Analysis, Florida Institute of Technology, Melbourne, FL USA
- OPEN HOUSE, 2013. Project Final Report

- Passer, A., Lasvaux, S., Allacker, K., De Lathauwer, D., Spirinckx, C., Wittstock, B., Wallbaum, H., 2015. Environmental product declarations entering the building sector: critical reflections based on 5 to 10 years experience in different European countries. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(9), 1199–1212. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0926-3>
- Röck, M., Hollberg, A., Habert, G., & Passer, A., 2018. LCA and BIM: Visualization of environmental potentials in building construction at early design stages. *Building and Environment*, 140, 153–161, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.006>
- Röck, M., Saade, M. R. M., Balouktsi, M., Rasmussen, F. N., Birgisdottir, H., Frischknecht, R., Passer, A., 2020. Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation. *Applied Energy*, 258, 114107. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107>
- UN-Habitat, 2017. *Building Sustainability Assessment and Benchmarking-An introduction VDI 2552 Blatt 11 BIM-Information Austausch anforderungen aus dem Richtlinienantrag*.
- Wastiels, L., Decuypere, R., 2019. *Identification and comparison of LCA-BIM integration strategies. SBE19 Graz*
- Fraunhofer Institute for Building Physics (IBP): *GENERIS v. 1.0 (www.generis-solution.eu)*, Stuttgart, 2019
- Zimmermann, R. K., Skjelmose, O., Jensen, K. G., Jensen, K. K., Birgisdottir, H., 2018. *Categorizing Building Certification Systems According to the Definition of Sustainable Building, WMCAUS 2018, Prague-Czech Republic*

CONCEPT FOR SOFT-LINKING A MULTI-ENERGY SYSTEM CO-PLANNING MODEL TO AN URBAN ENERGY SIMULATION PLATFORM

C. B. Heendeniya¹, S. Köhler¹, B. Schröter¹

¹University of Applied Sciences - Stuttgart, Stuttgart, Germany

ABSTRACT

Soft-linking multi-energy system (MES) models with urban energy simulation platforms (UESP) enable high spatial resolution modeling of local energy systems. The smallest energy unit of an urban MES model is the “building energy-hub” that describes the interaction between different energy carriers in a building. A building also represents a data structure that consists of geometrical, topological, and semantic information in a UESP.

In this paper, we present a concept and first results of a simple urban use-case for soft-linking MES models and UESP. The potential to extend this method to model the interactions among many prosumers is also discussed.

SYMBOLS

Sets:

T = Set of time-steps

I = Set of technologies

Parameters:

η_{bat} = Battery efficiency

$P_{bat}^{ch,max}, P_{bat}^{dc,max}$ = Max. battery charge and discharge rates

Ω_{ramp} = Max. heat pump ramp rate

$\varphi_{grid}^{CO2}, \varphi_{dhn}^{CO2}$ = Emission factors for electricity and district heating

$\lambda_{inv}, \lambda_{op}, \lambda_{feed}$ = Investment, operation, and feed-in costs

$\lambda_{grid}, \lambda_{dhn}$ = Energy purchase cost from grid and district heating network

Variables:

P_{grid} = Power import from the grid

P_{hp}, P_{el} = Heat pump and building elect. demand

$P_{bat}^{ch}, P_{bat}^{dc}$ = Charge/ discharge power of battery

Q_{dhn} = Heat import from district heating network

Q_{hp}, S_{hp} = Heat pump energy for space heating and hot water generation

Q_{heat}, S_{hw} = Heating and hot water energy demand

$Q_{tess}^{ch}, Q_{tess}^{dc}$ = Charge/ discharge power of thermal storage

S_{hw}^{ch}, S_{hw}^{dc} = Charge/ discharge power of hot water buffer storage

H_{pv} = PV generation

$P_{pv}, P_{feed}, P_{curt}$ = PV consumption, feed-in, and curtailment

COP_{hp} = Heat pump efficiency

SoC_{bat} = Battery state-of-charge

C_{bat}, C_{hp} = Battery and heat pump installed capacity

INTRODUCTION

Energy system co-planning models combine the characteristics of expansion and operation planning models, whereby the expansion decisions are determined by considering the operational aspects of the energy system. The requirement for considering operational details of the energy system in the expansion planning process stems from the increase of variable renewable energy generation and the smart-grid technologies in the energy system. The weather-dependent energy production, behavior dependent demand, and incentive-driven control strategies directly influence the future technology mix we require to achieve the economic optimality while meeting other technical and environmental requirements.

A recent review article by (Heendeniya et al., 2020) discusses the status-quo of district-scale energy system co-planning models. The article identifies key challenges and the future research potential for modeling district-scale multi-energy systems (MES), in which multiple energy vectors dynamically interact

with each other that discussed under three main aspects.

1. Temporal resolution.
2. Energy system and network models.
3. Spatial granularity.

(Heendeniya et al., 2020) further emphasizes that linking MES co-planning models with UESP, enable more comprehensive and high-resolution evaluation of energy scenarios in the districts. Some examples of the state-of-the-art UESP and their capabilities to represent energy network and multi-energy couplings are shown in Table 1.

Table 1: Energy network and multi-energy interaction modeling capabilities of some existing UESP.

REF.	ENERGY NETWORK MODEL	MULTI-ENERGY COUPLINGS
Hong et al, 2016	None	No
Reinhart et al, 2013	None	No
Bergerson et al, 2015	None	No
Nageler et al, 2017	District heating only	No

This contribution builds on top of the insights from (Heendeniya et al., 2020), attempts to conceptualize a method to couple MES co-simulation with the UESP SimStadt. SimStadt uses 3D CityGML files as the primary input and connects the geometric, semantic, and topological data from CityGML files to several databases and libraries. The calculation of building energy demands and renewable energy potentials is performed by the INSEL simulation engine (Nouvel et al., 2015). Figure 1 shows a graphical overview of SimStadt and (Weiler et al., 2019) provides a comprehensive description of the architecture and the current applications of SimStadt.

In the proposed concept, each building in the neighborhood is represented by an equivalent energy-hub model and a mixed-integer optimization algorithm is implemented to evaluate the optimal co-planning strategy for each of the building. The buildings may interact with each other and with the external energy system through the energy network.

The objective of this contribution is to,

1. present the broad concept for soft-linking SimStadt and MES co-simulation model,
2. discuss the necessity to model part-load performance of distributed generators, and present a methodology to accomplish that,
3. present a simple use-case of a single-building energy-hub that soft-links with SimStadt UESP,
4. share future directions and potential for multi-disciplinary research collaborations.

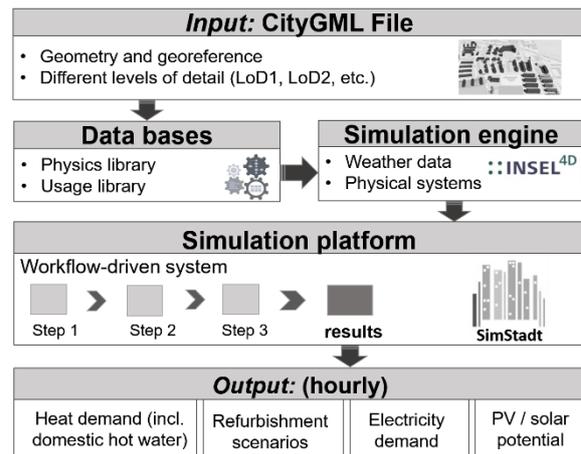


Figure 1: Simplified structure of SimStadt with inputs and outputs

CONCEPT AND METHODOLOGY

Overview

Figure 2 shows one (simple) way of conceptualizing the district-scale MES co-simulation within an UESP. The architecture in figure 1 has several sub-modules that generates/ forecasts energy demand profiles for each building. The generated demand and renewable generation profiles are stored in a cloud-based data platform accessible to the MES co-simulation model.

Figure 3 illustrates the energy-hub model of a single building. The energy-hub models represent electricity, heating, and domestic hot water energy demand vectors. The energy supply vectors are the utility network for electricity, heat, and renewable energy from solar photovoltaics. It also models the charging and discharging of the battery and thermal storage and power-to-heat conversion via a ground-source heat pump (GSHP).

Mathematical model

This section explains the mathematical representation of the energy-hub model and the co-planning optimization problem for a single building.

The mathematical representation of the energy-hub model captures the fundamental demand and supply balances for each energy carrier and the conversion between energy carriers.

Equation 1-3 describe the energy balance equations for electricity, heat, and hot water at each time-step in the planning period. The most common application of building-scale battery storage is to improve the self-consumption of renewable generation. Thermal storage is used to store heat from power-to-heat conversion. These intentions are described using the binary decision variables $x_{bat}^{ch}(t)$, $x_{bat}^{dc}(t)$, $x_{tess}^{ch}(t)$, $x_{tess}^{dc}(t)$, $x_{hw}^{ch}(t)$, $x_{hw}^{dc}(t)$ that indicate whether a charging or discharging action occurs for each type of storage at each time-step. We implement a quadratic formulation of the energy

balance equations with the above-mentioned decision variables to constrain the battery and thermal storages from being charged by grid electricity supply and district heating supply.

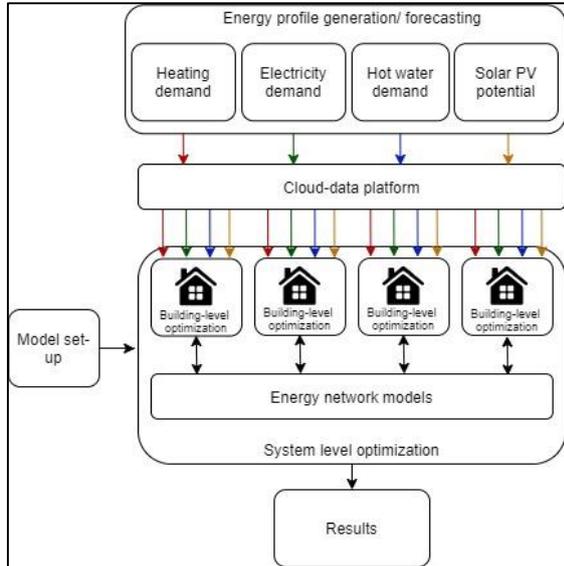


Figure 2: Concept for neighborhood-scale energy simulations by coupling a MES co-optimization model and an UESP.

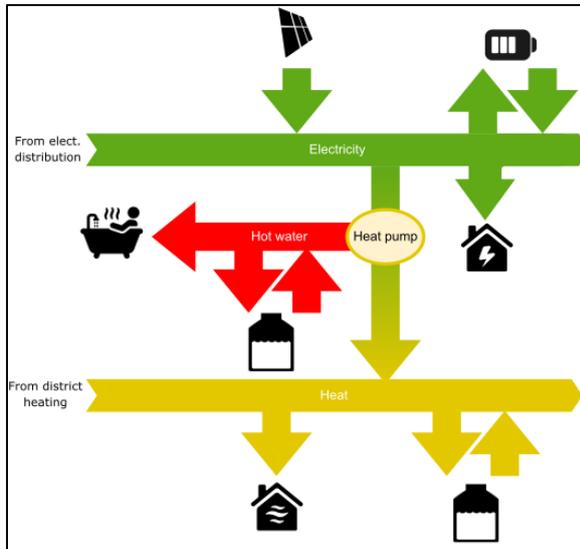


Figure 3: The energy-hub representation of the multi-energy system for a single building.

$$\begin{aligned} P_{grid}(t) \cdot (1 - x_{bat}^{ch}(t)) + P_{pv}(t) \\ - P_{bat}^{ch}(t) \cdot x_{bat}^{ch}(t) \\ + P_{bat}^{dc}(t) \cdot x_{bat}^{dc}(t) \\ - P_{hp}(t) - P_{el}(t) \end{aligned} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Q_{dhn}(t) \cdot (1 - x_{tess}^{ch}(t)) \\ - Q_{tess}^{ch}(t) \cdot x_{tess}^{ch}(t) \\ + Q_{tess}^{dc}(t) \cdot x_{tess}^{dc}(t) \\ + Q_{hp}(t) - Q_{heat}(t) \end{aligned} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} -S_{hw}^{ch}(t) \cdot x_{hw}^{ch}(t) + S_{hw}^{dc}(t) \cdot x_{hw}^{dc}(t) \\ + S_{hp}(t) - S_{hw}(t) \end{aligned} = 0 \quad (3)$$

$$\forall t \in T$$

The renewable electricity from PV must be either consumed (directly or via storage), fed back to the grid, or curtailed (equation 4). The PV power feed-in at any time-step t should be less than the maximum power feed-in.

$$H_{pv}(t) - P_{feed}(t) - P_{curt}(t) = P_{pv}(t) \quad (4)$$

$$\forall t \in T$$

The conversion of one energy carrier to another is characterized by the corresponding conversion efficiency. Equation 5 describes the relationship between the thermal output of the GSHP and its electrical input. The COP depends on the loading of the heat pump at each time-step, as shown by equation 6. Here, $\gamma_{hp}(t)$ is the part-load level of the GSHP at time t and $C_{hp}(t)$ is the installed capacity of the GSHP.

$$Q_{hp}(t) + S_{hp}(t) = COP_{hp}(t) \cdot P_{hp}(t) \quad (5)$$

$$Q_{hp}(t) + S_{hp}(t) = \gamma_{hp}(t) \cdot C_{hp} \quad (6)$$

$$\forall t \in T$$

The relationship between the part-load level and the COP is shown in figure 4, which is mathematically modelled using a piece-wise linear approximation.

The dynamics of charging and discharging the energy storage is described in equations 7-8.

$$\begin{aligned} SoC_{bat}(t-1) + P_{bat}^{ch}(t) \cdot x_{bat}^{ch}(t) \cdot \eta_{bat} \\ - P_{bat}^{dc}(t) \cdot x_{bat}^{dc}(t) \cdot \eta_{bat} \end{aligned} = SoC_{bat}(t) \quad (7)$$

$$\forall t \in T \text{ and } t \neq 1$$

$$\begin{aligned} P_{bat}^{ch}(t) \cdot x_{bat}^{ch}(t) \cdot \eta_{bat} \\ - P_{bat}^{dc}(t) \cdot x_{bat}^{dc}(t) \cdot \eta_{bat} \end{aligned} = SoC_{bat}(t) \quad (8)$$

$$\forall t \in T \text{ and } t = 1$$

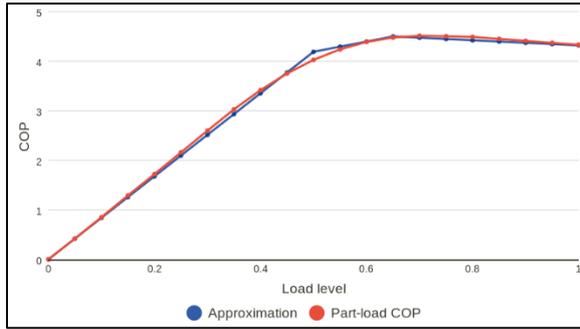


Figure 4: Part-load efficiency variation of the GSHP.

The time-step resolution is not explicitly shown in equations 7-8, because in this case-study, we use one-hour time-steps. The state-of-charge of battery storage at time t is limited to the installed capacity of the battery storage (equation 9) and the charging and discharging power is limited to the maximum charge/discharge power (equations 10-11). The storage dynamics for thermal and hot water buffer storages are modeled similarly.

$$\text{SoC}_{bat}(t) \leq C_{bat} \quad (9)$$

$$P_{bat}^{ch}(t) \leq P_{bat}^{ch,max} \quad (10)$$

$$P_{bat}^{dc}(t) \leq P_{bat}^{dc,max} \quad (11)$$

$$\forall t \in T$$

The ability of the heat pump to increase and decrease its electrical power input (hence the thermal power output) is a useful source of flexibility for the local power distribution network (Fischer et al, 2017).

$$\Omega_{ramp} \leq Q_{hp}(t) + S_{hp}(t) - Q_{hp}(t-1) - S_{hp}(t-1) \quad (12)$$

$$-\Omega_{ramp} \geq Q_{hp}(t) + S_{hp}(t) - Q_{hp}(t-1) - S_{hp}(t-1) \quad (13)$$

$$\forall t \in T \text{ and } t \neq 1$$

The equations 12 and 13 define the maximum heat pump power-up and power-down (ramp) rate constraints.

The total amount of CO₂ emissions that results from the MES operation is calculated by equation 14. Here, $\varphi_{grid}^{CO_2}$ and $\varphi_{dhn}^{CO_2}$ are the CO₂ emission factors of the electricity distribution and district heating, respectively (equation 12).

$$\sum_{t \in T} P_{grid}(t) \cdot (1 - x_{bat}^{ch}(t)) \cdot \varphi_{grid}^{CO_2} + \sum_{t \in T} Q_{dhn}(t) \cdot (1 - x_{tess}^{ch}(t)) \cdot \varphi_{dhn}^{CO_2} = \pi_{CO_2} \quad (14)$$

The total cost of the MES co-planning is the annualized sum of the investment, operation, and

energy purchase costs. In equations 15-19, σ_{inv} , σ_{op} , σ_{en} , and σ_{fit} are the total investment cost, operation cost, energy cost, and feed-in revenue for the planning horizon. The technology life time and the discount rate are given by n and r , respectively.

$$\sum_{l \in I} C(l) \cdot \lambda_{inv}(l) \left[\frac{r \cdot (1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \right] = \sigma_{inv} \quad (15)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{l \in I} P(l, t) \cdot \lambda_{op}(l) = \sigma_{op} \quad (16)$$

$$\sum_{t \in T} P_{grid}(t) \cdot (1 - x_{bat}^{ch}(t)) \cdot \lambda_{grid} + \sum_{t \in T} P_{dhn}(t) \cdot (1 - x_{tess}^{ch}(t)) \cdot \lambda_{dhn} = \sigma_{en} \quad (17)$$

$$\sum_{t \in T} P_{feed}(t) \cdot \lambda_{feed} = \sigma_{fit} \quad (18)$$

$$\sigma_{inv} + \sigma_{op} + \sigma_{en} - \sigma_{fit} = \sigma_{total} \quad (19)$$

The optimization objective of the co-planning problem is to minimize the total cost σ_{total} .

$$\text{Obj. function} = \text{Min. } \sigma_{total} \quad (20)$$

PART-LOAD EFFICIENCY MODELING

Significance of part-load efficiency curve modeling

The part-load operation and short cycling conditions result in the efficiency degradation of heat pumps (Waddicor et al., 2016). The heating and hot water demand in buildings can be significantly time-varying; therefore, it can impose highly variable loading conditions on the heat pump. The effect of variable loading conditions on the heat pump depends on the sizing and the operating strategy of the heat pump. In other words, by choosing the optimal size and the operation strategy for the heat pump, it is possible to minimize the loss of efficiency at part-load conditions. Therefore, MES co-planning models must consider the variation of heat pump efficiency under variable loading conditions.

Piece-wise linear approximation of the GSHP part-load efficiency curve

This subsection provides a detailed explanation of the piece-wise linear approximation of the GSHP part-load efficiency curve.

Piece-wise linear approximation of a non-linear function can be evaluated by sampling the non-linear function into several "pieces" and then calculating the linear curve-fitting of the non-linear function inside the domains represented by those pieces. In our co-planning model, the part-load efficiency curve of the GSHP is a piece-wise linear approximation function with three pieces.

To model the piece-wise linear approximation, we introduce a set of four weight variables W and a set of four binary decision variables Y (equations 21-22). Assuming (α_1, β_1) , (α_2, β_2) , (α_3, β_3) , and (α_4, β_4) are

the breakpoints of the three linear segments, we can model the piece-wise linear approximation as shown in the equations 23-30.

$$W = \{w_i | w_i \in \mathbb{R}^+, 0 \leq w_i \leq 1, i = 1,2,3,4\} \quad (21)$$

$$Y = \{y_i | y_i \in \{0,1\}, i = 1,2,3,4\} \quad (22)$$

$$COP_{hp}(t) = \sum_i \beta_i \cdot w_i(t) \quad (23)$$

$$\gamma_{hp}(t) = \sum_i \alpha_i \cdot w_i(t) \quad (24)$$

$$1 = \sum_{t \in T} w_i(t) \quad (25)$$

$$2 \geq \sum_{t \in T} y_i(t) \quad (26)$$

$$y_i(t) \geq w_i(t) \quad (27)$$

$$1 \leq y_1(t) + y_3(t) \quad (28)$$

$$1 \leq y_1(t) + y_4(t) \quad (29)$$

$$1 \leq y_2(t) + y_4(t) \quad (30)$$

$$\forall t \in T$$

CASE-STUDY

The case study is a multi-family building in Stuttgart - Germany (figure 5). The building has;

- a footprint area of 2,311m²,
- a total roof area of 2,366m² and,
- a heated area of 6,174m².

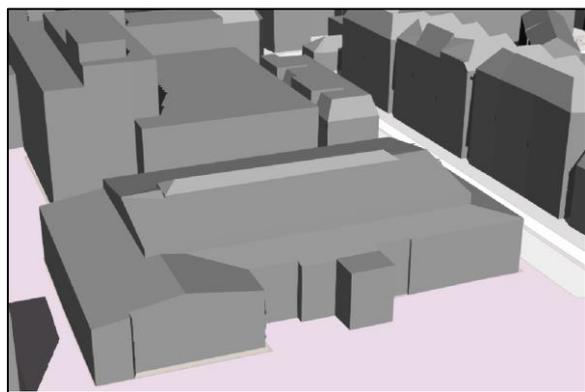


Figure 5: 3D visualization of the multi-family building in Stöckach.

Each of the four stories of the building has an average height of 3.3 meters. The building contains 77 households and a total occupancy of 152 people. The total yearly heat demand (incl. domestic hot water) is estimated at 320.12MWh/a, and the electricity demand is 215.46MWh/a. The heating demand is calculated with DIN 18599, using parameters, like U-values from the German Building Typology (Loga et

al., 2015). This building is specified with a year of construction in 2002 and has an average U-value of 0.39 W/(m²K). Other key model parameters are given in Table 2.

Table 2: Key model parameters.

MODEL PARAMETER	VALUE
Rated HP COP	4.47
Thermal storage efficiency	0.90
Hot water buffer storage efficiency	0.90
Battery storage efficiency	0.95
Electricity cost	0.30 EUR/kWh
District heating cost	0.10 EUR/kWh
Investment costs:	
- PV roof top	1000 EUR/kW
- Heat pump	1400 EUR/kW
- Battery storage	1066 EUR/kW
- Thermal (and buffer) storage	60 EUR/kW
Operation cost:	
- PV roof top	0
- Heat pump	0.001 EUR/kWh
- Battery storage	0.005 EUR/kWh
- Thermal (and buffer) storage	0.002 EUR/kWh

Figure 6 shows the SimStadt-generated hourly thermal load profile for the whole building. The heating period is set from October to April, while the interior set point temperature is defined with 20°C and the heating limit temperature is set to 15°C. Also, a night-time temperature setback is considered from midnight until 6 am. The highest peak demand is seen on January 12th with 135kW.

Figure 7 and figure 8 show the hourly electricity load profile for a typical winter period (January 1st till January 14th) as well as a typical summer period (June 1st till June 14th). The baseload throughout the year is 10kW, the average at 24.6kW with a minimum/maximum value of 7.3/64.1kW.

Nine roof surfaces with a total area of more than 40m² are considered for the PV potential calculation. Due to practical reasons, smaller surfaces are not taken into consideration. The total available roof area for PV installation, hence, is 2,297m². To model the relationship between the hourly PV production and the installed capacity, we normalize the hourly PV generation potential with an area requirement of 6m²/kWp. A set of 2880 representative time-steps (one month per season) is selected to keep the computational time within a reasonable limit.

The optimization problem is modeled in python programming language and solved using Gurobi 9.0.0 (academic license) solver.

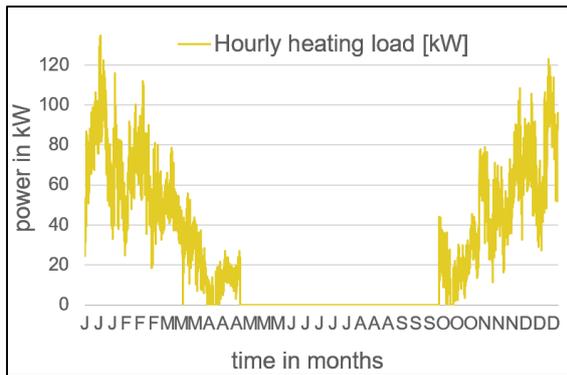


Figure 6: Hourly heating demand of the building for an entire year.

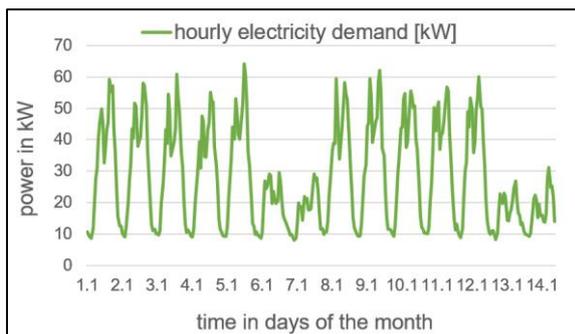


Figure 7: Hourly electricity demand of the building for two winter weeks.

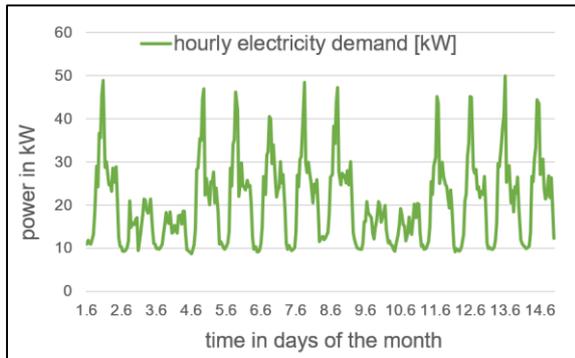


Figure 8: Hourly electricity demand of the building for two summer weeks.

RESULTS

We compared the results of the MES model with and without implementing the part-load efficiency variation of the heat pump. In the latter, the heat pump efficiency is equal to its maximum rated efficiency at every time-step.

Influence of part-load modelling on thermal storage

Table 3 shows the optimal value calculated by the MES co-planning model for four different decision variables when the heat pump part-load efficiency variation is considered and when not. The most significant difference that we observe is in the optimal

sizing of thermal and buffer storages. This observation is intuitive because when there is no penalty for the low part-load operation of the heat pump, the benefits of thermal and buffer storage to improve heat pump capacity utilization are not well-demonstrated. The resulting unfavorable cost-benefit balance hinders the installation of thermal and buffer storage.

Table 3:

The optimal value calculated for various model variables with and w/o heat pump part-load efficiency variation.

MODEL VARIABLE	WITH PART-LOAD EFF. VARIATION	W/O PART-LOAD EFF. VARIATION
HP capacity	47.3 kW _{th}	45.9 kW _{th}
Thermal storage capacity	10.0 kWh	0.0 kWh
Hot water buffer storage capacity	262.3 kWh	247.8 kWh
Heat import from district heating network	32.5 MWh	34.2 MWh

Influence of part-load modelling on heat pump operation

The variation of the heat pump loading for the first 1200 time-steps of the simulation for time-varying and constant efficiency is shown in figure 9 and figure 10.

From the part-load efficiency curve in figure 4, we observe that the heat pump efficiency curve is relatively flat between 60 – 100% loading. Below the 60% load level, the efficiency drops rapidly.

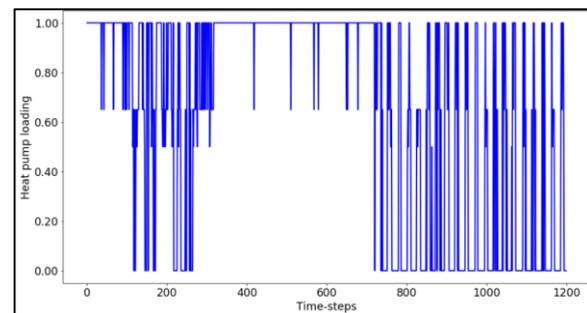


Figure 9: Heat pump loading over the first 1200 time-steps of the simulation under time-varying efficiency.

Figure 9 shows the influence of having an efficiency penalty for low part-load operation. In contrast to not having an efficiency penalty for low part-load operation (figure 10), we see that the heat pump tends to adjust its operating point to maintain approx. 60 - 100% loading the majority of the time. The thermal storage system provides the required flexibility so that the heat pump can optimally adjust its operating point (figure 11). On the flip-side, this may result in a higher

number of on-off sequences of the heat pump, as the heat pump tends to shut down entirely at low loading conditions.

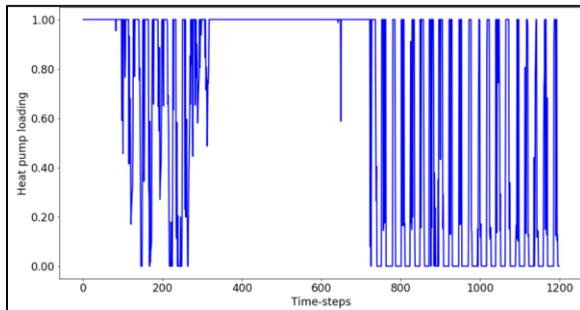


Figure 10: Heat pump loading during the first 1200 time-steps under constant efficiency.

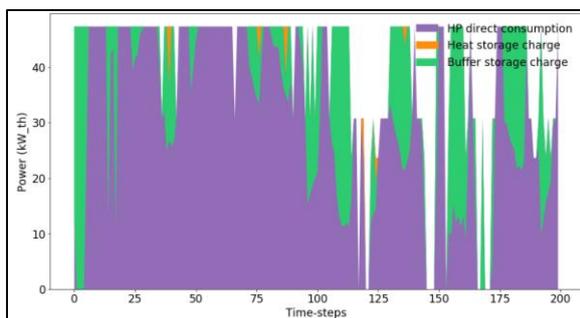


Figure 11: The direct consumption and charging of heat and hot water buffer storage with heat pump thermal energy output for the first 200 time-steps of the simulation with part-load efficiency modelled.

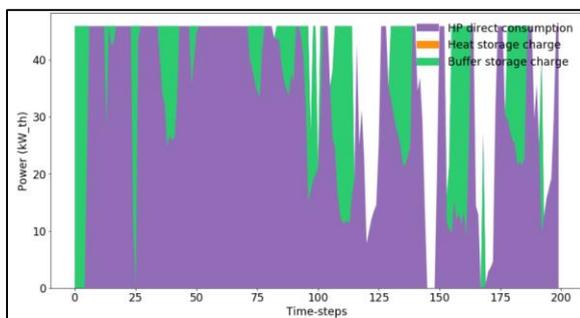


Figure 12: The direct consumption and charging of heat and hot water buffer storage with heat pump thermal energy output for the first 200 time-steps of the simulation at constant heat pump efficiency.

The ill-significances of the rapid heat pump on-off cycles are, 1) the degradation of the heat pump and 2) the negative effect on the local electricity distribution due to high starting current.

Influence of the ramp constraint on heat pump operation

Table 4 shows the optimal value for a set of selected decision variables with and without a maximum heat pump ramp limit of 2% (of the installed capacity) per time-step. The results show that the sizing of the technologies is not affected by the ramp constraint.

Table 4:

The optimal value calculated for various model variables with and w/o heat pump part-load efficiency variation.

MODEL VARIABLE	WITH RAMP CONSTRAINT	W/O RAMP CONSTRAINT
HP capacity	45.9 kW _{th}	45.9 kW _{th}
Thermal storage capacity	0.0 kWh	0.0 kWh
Hot water buffer storage capacity	247.8 kWh	247.8 kWh
Heat import from district heating network	34.4 MWh	34.2 MWh

The ramping constraint reduces the number of rapid on-off cycles that we observed previously.

Figure 13 shows that the ramping constraint, without the part-load efficiency variations, could lead to the heat pump operating more frequently at very low part-load conditions.

The stack plot in figure 14 shows the shares of the thermal energy output of the heat pump that is directly consumed and used to charge thermal and hot water buffer storage for the first 200 time-steps (for clear visualization).

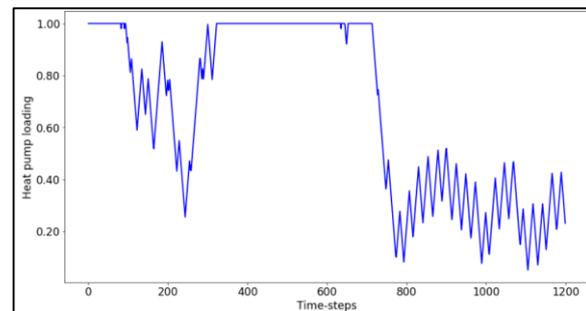


Figure 13: Variation of heat pump loading during the first 1200 time-steps with constant heat pump efficiency and 2% maximum ramp rate.

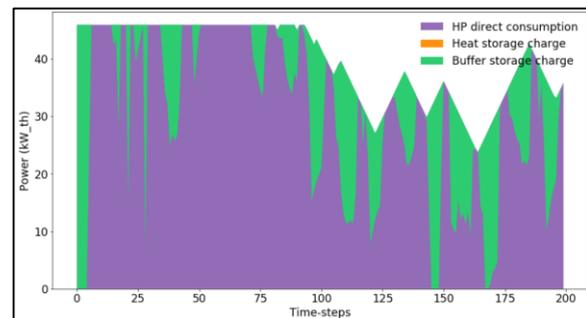


Figure 14: The direct consumption and charging of heat and hot water buffer storage with heat pump thermal energy output for the first 200 time-steps of the simulation with 2% maximum ramp rate.

DISCUSSION AND CONCLUSION

The two main arguments to why part-load efficiency variation of heat pumps must be considered in MES co-planning models are; firstly, it influences the cost-optimal scheduling of the heat pump and secondly it enables demonstration of the load-shifting benefits of thermal storage systems in the energy system to improve heat pump capacity utilization.

The heat pump ramping constraint, on the other hand, sets a threshold to heat pumps ability to follow the thermal demand. Whether the ramping constraint significantly affect the operating flexibility of the heat pump depends on the thermal demand profile of the building.

Frequent on-off cycles of the heat-pump reduces the life-time of the heat pump and unfavorable for the power system. Such effects can only be visualized by integrating a dynamic power system model in the future.

The main challenge of soft-linking UESP and MES optimal co-planning models are the scalability. The run-time of mixed integer optimization models grows exponentially as the increasing number of decision variables, which is the case when the number of simulated buildings increase. One of the ways to lower the computational burden is to carefully select the minimum number of representative time-steps by considering the trade-offs between the required solution accuracy for the given co-planning objective and the computational burden. This method, although widely popular, does not reduce the complexity of the problem structure.

A hierarchical structure to the optimization problem that aligns better with the microgrid control architecture is also interesting to look at. In such an architecture, the optimization problem maybe defined at the system, building, and the heat pump level taking into account the key planning decisions that needs to be taken at each hierarchical level. The planning horizon, inputs, and constrains can be defined only as relevant to each hierarchical level; therefore, reducing the complexity.

ACKNOWLEDGEMENT

The lead author is supported by M4_LAB. M4_LAB is a transfer project at the University of Applied Sciences - Stuttgart within the framework of the "Innovative Hochschule" initiative funded by the Federal Ministry of Education and Research under the grant number 03IHS032A. We also wish to thank Ruben Pesch for the insightful discussions and support.

REFERENCES

Heendeniya, C. B., Sumper, A., & Eicker, U. (2020). The multi-energy system co-planning of nearly zero-energy districts – Status-quo and future

research potential. In *Applied Energy*, 267. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114953>

- Hong, Tianzhen; Chen, Yixing; Lee, Sang Hoon; Piette, M. (2016): CityBES: A Web-based Platform to Support City-Scale Building Energy Efficiency. In *Urban Computing* (14), p. 2016.
- Reinhart, C.; Dogan, Timur; Jakubiec, J.; Rakha, Tarek; Sang, Andrew (2013): UMI - An urban simulation environment for building energy use, daylighting and walkability. In *Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association*.
- Bergerson, Joshua; Muehleisen, Ralph; Rodda, Bo; Auld, Joshua; Guzowski, Leah; Ozik, J.; Collier, Nicholson (2015): Designing Future Cities – LakeSIM Integrated Design Tool For Assessing Short- and Long-Term Impacts of Urban Scale Conceptual Designs. In *ISOCARP Review* 11, pp. 48–63.
- Nageler, P.; Zahrer, G.; Heimrath, R.; Mach, T.; Mauthner, F.; Leusbrock, I. et al. (2017): Novel validated method for GIS based automated dynamic urban building energy simulations. In *Energy* 139, pp. 142–154. DOI: 10.1016/j.energy.2017.07.151.
- Nouvel, R., Brassel, K. H., Bruse, M., Duminil, E., Coors, V., Eicker, U., & Robinson, D. (2015). SimStadt, a new workflow-driven urban energy simulation platform for CityGML city models. *CISBAT 2015 Proceedings*, 889-894
- Weiler, V., Stave, J., & Eicker, U. (2019). Renewable Energy Generation Scenarios Using 3D Urban Modeling Tools—Methodology for Heat Pump and Co-Generation Systems with Case Study Application. *Energies*, 12(3), 403. doi: 10.3390/en12030403
- Fischer, D., & Madani, H. (2017). On heat pumps in smart grids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 342–357. doi: 10.1016/j.rser.2016.11.182
- Orehounig, K., Evins, R., & Dorer, V. (2015). Integration of decentralized energy systems in neighbourhoods using the energy hub approach. *Applied Energy*, 154, 277–289. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.04.114
- Waddicor, D. A., Fuentes, E., Azar, M., & Salom, J. (2016). Partial load efficiency degradation of a water-to-water heat pump under fixed set-point control. *Applied Thermal Engineering*, 106, 275–285. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.05.193
- Loga, T., Stein, B., Diefenbach, N., & Born, R. (2015). Deutsche Wohngebäudetypologie Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. *Darmstadt: Wohnen und Umwelt*.

TOOL CHAIN FOR LCA-BASED INTEGRAL PLANNING SUPPORT IN THE CONTEXT OF SUSTAINABLE BUILDING ASSESSMENT

S. Ebertshäuser¹ und P. von Both¹

¹Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Deutschland

ABSTRACT

Up to now Sustainable-Building-Assessment (SBA) is applied only after the building has been constructed. Great potential for optimized sustainable building design lies in the possibility to shift this process into the (early) planning phase. Besides the lack of its early application also stands today's practice of redundant, tedious and cumbersome data acquisition at the base of SBA. Here, under great effort missing and inaccurate data has to be gathered from various stakeholder, supplemented and verified at the end of the construction phase.

How can this problem field be addressed with regard to planning methodology?

Solving complex questions regarding energy efficiency and sustainability of buildings requires an integrated planning approach. Rather than only examining the energetic performance of the system in single phases, for an overall optimization all flows of energy and matter together with respective grey energy throughout the lifecycle have to be taken into consideration. In turn, a holistically integrated planning process implies a consistent accompanying evaluation and optimization of the planned object. Early application of lifecycle and sustainability assessment tools in the process would enable for indication of consequences regarding design alternatives at hand and hence, help decision maker in pursuing a sustainable construction.

Therefore, enabling this in practice by providing tools is one objective in an ongoing research project. The approach tackles prevailing problems in current planning practice on process level as well as information requirements on data level. At its core stands the provision of a process accompanying BIM information basis for the context lifecycle assessment by extending the open standard Industry-Foundation-Classes. Along a concept of steps towards the concretization of planning a systematic has been developed and implemented as Model-View-Definition for this side of data. Using this data exchange interface a tool chain – BIM to LCA to SBA – is presented in this contribution.

EINLEITUNG

Bisher erfolgt der Prozess der Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden (SBA), z.B. mit dem System der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V. (DGNB) oder dem Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) der Öffentlichen Hand, erst nach Planung und Bau des Gebäudes. Ein großes Potenzial für eine optimierte Gebäudeplanung bezüglich der Nachhaltigkeit des Bauwerks liegt jedoch in der Möglichkeit, diesen Prozess in die (frühe) Planungsphase zu verlagern. Indem den Entscheidungstragenden und Entwerfenden die Konsequenzen ihrer Planungsentscheidungen direkt im Entwurfsprozess angezeigt werden, kann die Qualität des späteren Gebäudes erheblich verbessert werden. Bei der Komplexität des Themenfeldes der Nachhaltigkeit lässt sich dies jedoch nur schwer ohne eine Unterstützung von IT-basierten Hilfsmitteln realisieren. Neben einem diesbezüglich unzureichend auf die Anforderungen der frühen Planungsphasen ausgerichtetem Instrumentarium kommt in der aktuellen Planungspraxis hinzu, dass der Prozess der Datenerfassung als Grundlage für die Bewertungen langwierig und umständlich ist (Gantner u.a., 2018). Fehlende und ungenaue Daten müssen dabei am Ende der Bauphase von verschiedenen Akteuren unter großem Aufwand als Basisdaten der Nachhaltigkeitsbewertung gesammelt bzw. „rekonstruiert“ und aufwändig nachmodelliert werden.

Wie kann dieses Problemfeld nun in Bezug auf die Planungsmethodik angegangen werden?

Die Lösung komplexer Fragen zur Energieeffizienz und Nachhaltigkeit von Gebäuden erfordert einen *integrierten* Planungsansatz. Anstatt nur die energetische Leistung des Systems in einzelnen Phasen (z.B. Betriebsphase) zu untersuchen, müssen für eine Gesamtoptimierung des Gebäudes alle Flüsse expliziter Energie und Materie zusammen mit der jeweiligen grauen Energie über den gesamten Lebenszyklus berücksichtigt werden. Ein ganzheitlich integrierter Planungsprozess impliziert wiederum eine konsequente planungsbegleitende Bewertung und Optimierung des Planungsgegenstandes (vgl. v. Both,

2011). Dabei kann eine frühzeitige Anwendung von IT-gestützten Tools der Ökobilanz bzw. Nachhaltigkeitsbewertung im Prozess eine optimierte Entscheidungsfindung bereits bei der ersten Entwicklung von alternativen Konzepten für das Gebäude ermöglichen. Auch ließe sich damit eine kostspielige Nachtragsplanung zur Erreichung von (nachgelagert gefassten) Nachhaltigkeitszielstellung vermeiden, wenn die gewichtigsten Entscheidungen bereits gefallen sind oder gar mit dem Bauen bereits begonnen wurde.

Diese methodischen (Planungs-) Ansätze in der heutigen Praxis zu ermöglichen, ist eines der Ziele des Forschungsprojekts BIM2LCA4IP, in dessen Rahmen der Beitrag steht. Der Lösungsansatz befasst sich dabei mit den in der aktuellen Planungspraxis auf Prozessebene vorherrschenden Problemen frühzeitiger Integration von Nachhaltigkeitsaspekten sowie den entsprechend dafür benötigten Informationsanforderungen auf Datenebene. Zur durchgängigen Unterstützung der Akteure bei ihren Planungsentscheidungen sowohl mit methodischen Hinweisen als auch technischen Datenschnittstellen zur BIM-basierten Anbindung von Werkzeugen der Ökobilanz und Nachhaltigkeitsbewertung wurde als zentraler Bezugsrahmen basierend auf einer umfassenden Prozess- und Literaturanalyse ein Phasenmodell für die integrale Planung entwickelt (Rexroth u.a., 2018). Für die Datenebene wurde mit einer Systematik aufeinander aufbauender Informationsstufen ein Beitrag für die in der Praxis derzeit diskutierten Fertigungsgrade (vgl. engl.: Level of [Detail | Development | Geometry | Information | usw.]) für die LCA Perspektive entwickelt.

Im Kern zielt die Systematik auf einen Ansatz zur mehrstufigen Informationsstrukturierung des Planungsgegenstands ab, sodass durchgängig im Prozess der Entwicklungsstand von sich konkretisierenden Planungsinformationen jeweils während der Phasen des Projekts darstellt werden kann. Am Anfang stehen dabei beispielsweise LCA-basierte Auswirkungen von avisierten Zielen und Anforderungen, die auf Basis von Benchmarks bereits bewerteter ähnlicher Referenzgebäude gebildet werden (vgl. Ebertshäuser u.a., 2019). Diese groben typologie-gestützten Informationen zu den Umweltwirkungen können dann sukzessive im Prozess verfeinert werden, wenn im konkretisierten, modellbasierten Planungsobjekt spezifischere Informationen als Eingabe für LCA-Tools zur Verfügung stehen (Rexroth u.a., 2018 sowie Gantner u.a., 2018).

Um die Akteure bei der (prozessbegleitenden) Erreichung einer auf Nachhaltigkeit ausgerichteten Gebäudeplanung, auch mit den auf der Systematik aufbauenden Ansätzen zur Datenverarbeitung, unterstützen zu können, werden im Rahmen des Projektes untersuchte planungsmethodische Aspekte

einer integralen Planungsweise in einer webbasierten Informationssammlung zusammengeführt. Neben der Unterstützung der Akteure beim Fassen geeigneter Zielstellung bezüglich der Nachhaltigkeit soll damit die Organisation des Projekts entsprechend unterstützt werden, um die gesetzten Nachhaltigkeitsziele während des gesamten Prozesses konsequent verfolgen zu können.

Basierend auf einer umfassenden Analyse wurden hierzu neuralgische Punkte im Planungsprozess identifiziert, bei denen es wichtig ist, Nachhaltigkeitsaspekte und Kriterien für eine nachhaltige Gebäudeplanung zu berücksichtigen (Gantner u.a., 2018). Dabei wurden die Informationsanforderungen bezüglich der Ökobilanz als Input für Gebäudebewertungssysteme (DGNB, BNB) berücksichtigt. Die Praxispartner innerhalb des Projektteams ergänzten diese Analyse der bestehenden SBA, indem sie phasenorientierte Best Practices und andere Richtlinien für eine integrale Planungspraxis zur Erreichung nachhaltiger Gebäude einbrachten. Zur thematischen Sensibilisierung der Bauherren bzw. der Bereitstellung eines (veranschaulichenden) Wissenspools für beratende Akteure wird damit im Themenfeld des Nachhaltigen Bauen mit einem Fokus auf die Ökobilanz darauf abgezielt die Grundlagen einer planungsbegleitenden Entscheidungsunterstützung zu verbessern. Aus Sicht der LCA werden Wissensinhalte zu wichtigen Aspekten der Nachhaltigkeit von Gebäuden sowie deren adäquate Behandlung im Planungs-, Erstellungs- bzw. Betriebsprozess entwickelt und phasenorientiert dargestellt. Adressiert werden können damit dann sowohl nicht versierte Anwendende durch niederschwellige Informationsangebote wie auch bedarfsorientiert recherchierende Fachexperten mit z.B. zur Vermittlung ihrer fachlichen Inhalte an die phasenspezifischen Akteure benötigtem Veranschaulichungsmaterial. Neben dieser Prozessunterstützung werden im Projekt mittels Datenschnittstellen Grundlagen zur verbesserten Anbindung von Ökobilanz- und Nachhaltigkeitsbewertungswerkzeugen an die BIM-basierte Planung untersucht. Auf deren Basis sich dann auch die im Projektrahmen entwickelten und im Weiteren vorgestellten Tools in einer Werkzeugkette zur Entscheidungsunterstützung der Planenden zusammen mit den (ebenfalls an die Datenschnittstelle angepassten) LCA und SBA Expertenwerkzeugen anwenden lassen.

METHODEN

Den in diesem Beitrag als Teil einer Werkzeugkette vorgestellten Planungswerkzeuge (vgl. Kapitel ERGEBNISSE) unterliegt eine BIM-basierte Schnittstelle, über die für verschiedene Anwendungsfälle im Planungsprozess LCA-relevante Daten ausgetauscht werden können. Folgende

wichtigen methodischen Grundlagen stellen dabei wesentliche Gesichtspunkte dar, zu denen dann die konkrete Funktionalität der entwickelten Werkzeuge umgesetzt wurde.

Schnittstellenentwicklung

Auf der datentechnischen Seite bzw. der jeweils zur oben angeführten Systematik korrespondierenden Informationsmodellierung wurde im Projekt die Entwicklung einer durchgängigen Schnittstelle von der BIM-basierten Planung zur SBA verfolgt. Innerhalb dieses Ziels bildet der Anwendungsfall des Datenaustauschs zwischen den frühen Planungsphasen und den Werkzeugen der Ökobilanz einen Forschungsschwerpunkt (Rexroth u.a., 2018). Im Projekt wurde hierfür eine Modellsicht (engl. Model View Definition – MVD) für das etablierte, offene Austauschformat Industry Foundation Classes (IFC) im Rahmen eines Information Delivery Manual (IDM) entwickelt (vgl. Abbildung 1). Neben der Unterstützung der Entscheidungsfindung durch die Möglichkeit LCA-Tools schon frühzeitig für beispielsweise Variantenstudien in der Gebäudeplanung mittels BIM-basierter Anbindung anwenden zu können soll durch die formalisierte Spezifikation der LCA-Informationsbedarfe die Datenerfassung für SBA-Systeme signifikant verbessert werden. Im Gegensatz zu dem letztgenannten Prozess der Datenerfassung für eine SBA, deren Informationsbedarfe bereits genau definiert und allein durch die weiter vorgelagerte Verbesserung der BIM-basierten Informationsorganisation optimiert werden kann, sind für die frühen Planungsphasen bisher keine allgemeingültigen Ansätze oder Prozesse als einheitliche Grundlage einer (BIM-basierten) Datenverarbeitung erkennbar. Entsprechende Prozesse wurden daher a priori szenariobasiert festgelegt, um damit der Frage nachgehen zu können, wie LCA-relevante Daten in diesen frühen

Planungsphasen dargestellt werden können. Im ersten Schritt wurde die Ableitung von Prozessen in der frühen Planung, die sich aus den Erfahrungen der Praxispartner im Projekt ergaben, mit den für die Planung nachhaltiger Gebäude wichtigen Ziel- und Anforderungsplanung ergänzt. Auf dieser Grundlage konnte sodann der jeweilige Informationsbedarf für entsprechenden Datenaustausch zwischen den Input liefernden Planenden und den die LCA-Tools bedienenden Fachexperten identifiziert werden. Als abschließender Schritt wurden darauf aufbauend BIM-basierte Modelldaten für die Einbindung der LCA-Werkzeuge in den frühen Planungsphasen spezifiziert. Ein Anwendungsfall in der Phase der Einrichtung eines Projekts beschreibt beispielsweise ein erstes Treffen des Initiators und eines Nachhaltigkeitsexperten, bei dem gemäß dem Kenntnisstand des Bauherren Themen des nachhaltigen Bauens erörtert und eine Reihe von fundamentalen Zielen für das Projekt festgelegt werden. Im dazugehörigen Datenaustauschfall werden dabei mittels weniger Eingangsparameter aus Benchmarkdatenbasen Referenzprojekte zusammengestellt und in Form eines „initialen Designbriefs“ definiert. Da dieser und andere Anwendungsfälle im normbasierten Informationslieferungshandbuch (IDM) beschrieben sind, für das eine entsprechende MVD die jeweiligen Datenstrukturen auf Basis des offenen objektorientierten Bauwerksmodellstandard Industry Foundation Classes (IFC) in der Version 4 spezifiziert, wird ein vorgeschlagener Rahmen für den Umgang mit Ökobilanzdaten in der frühen Planungsphase gegeben. Die LCA-relevanten Eingangsparameter als Auswahlkriterien entsprechender Referenzbauwerke werden dabei in Form von Eigenschaftsobjekten im Rahmen eines IFC Modells an die Seite des webbasierten LCA-Werkzeugs übergeben. Diese für den Datenaustauschfall wichtigen Eigenschaftsobjekte können jedoch in derzeit

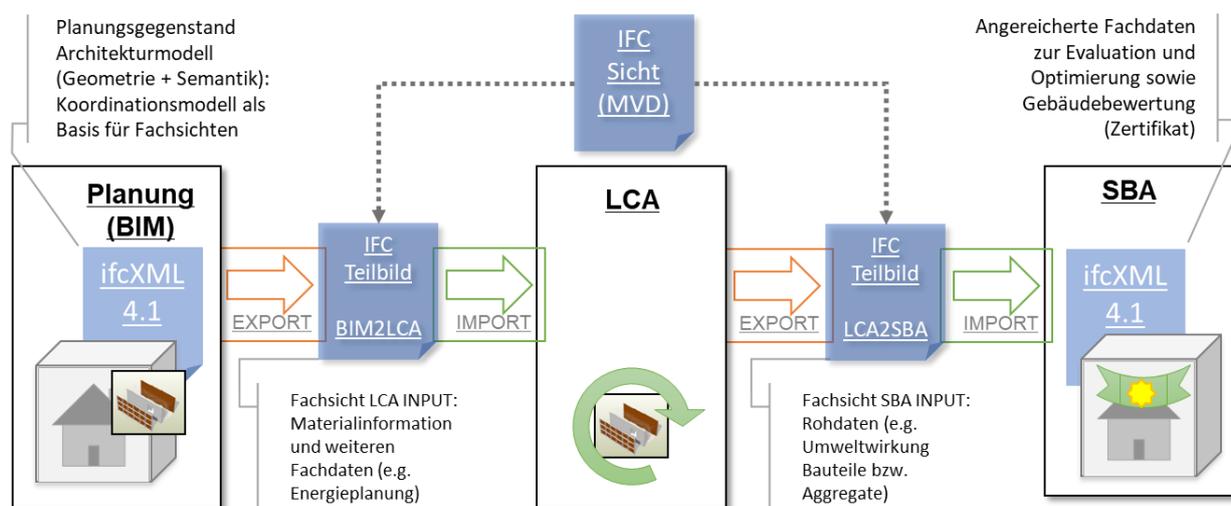


Abbildung 1: Verfolgter Datenfluss in der entwickelten IFC Schnittstelle

verfügbaren BIM-fähigen CAD-Systemen oftmals nicht selbständig modelliert werden. Hier deutet sich der Bedarf eines Hilfsmittels zur Ergänzung der Planungsmodelle mit benötigten Fachinformationen an, damit die Planer die mit den Benchmarkansätzen für die frühen Planungsphasen erweiterten Werkzeuge der Ökobilanz planungsbegleitend im Prozess zur Entscheidungsunterstützung anwenden können.

Werkzeugkonzeptionen

Mit einem bedarfsorientiert auf die IFC-Unterstützung der aktuell am Markt verfügbaren BIM-Autorensysteme abgestimmten Konzept eines IFC Editor Werkzeuges wird im Projekt gewährleistet, dass den BIM-basiert arbeitenden Planern alle in der MVD definierten Beschreibungsmöglichkeiten zu den LCA-relevanten Inhalten zur Verfügung stehen. Auch bezüglich der Aufbereitung der BIM-Modelle für die Ökobilanz im Rahmen der Bewertung werden benötigte Zusatzbeschreibungen im BIM-Modell damit ermöglicht. So lassen sich beispielsweise für die im DGNB System vorgesehenen Aggregatsstufen der LCA-Ergebniswerte (z.B. alle tragenden Außenwände) als Basis der Bewertung durch die Ergänzung von entsprechenden Elementen zur Gruppierung von Bauteilen die dafür vorgesehenen DIN 276 Kostengruppen abbilden. Eine weitere Modelleditierung stellt das Ergänzen von Referenzen zu extern vorgehaltenen Katalogdaten in die Bauwerksmodelle dar. Das Prinzip einen Bezugsrahmen für LCA-relevante Informationen durch einen webbasierten Lexikon- und Katalogserver zur Verfügung zu stellen ermöglicht den zentralen Baustein der im Projekt konzipierten MVD Schnittstelle zur Anbindung der LCA-relevanten Informationen an das IFC-basierte Planungsmodell. Durch die damit ermöglichte lose Kopplung können für die LCA grundlegende Basisinformationen eindeutig zugeordnet werden ohne damit das Planungsmodell zu überladen. Zudem wird die einfache Handhabung der planungsbegleitenden Abbildungskonzeption unterstützt, indem allein der Austausch von Katalogreferenzen ausreicht, um einen weiter konkretisierten Stand des Planungsgegenstands bezüglich der entsprechenden LCA-spezifischen Daten nachzuziehen. Das Ergänzen und Ändern von Referenzelementen sowie das Transformieren von externen Katalogdaten ins Modell zur spezifischen Anpassung stellt eine wesentliche Funktion des Werkzeuges dar.

Damit ein durch die Ergänzung der Planungsmodelle den Planenden ermöglichter modellbasierter Datenaustausch mit den LCA-Werkzeugen reibungslos funktioniert, bedarf es einer Kontrolle der Vollständigkeit von den zu übergebenden Modelldaten. Da ein Großteil der vorausgesetzten Informationsinhalte aus dem Architekturmodell stammt, wie beispielsweise sich aus der Geometrie ergebende Mengen, reicht hierbei eine manuelle

Sichtkontrolle nicht mehr aus. Daher stellt die programmatische formale sowie strukturelle Modellqualitätssicherung ein wichtiges Hilfsmittel dar, um die von den LCA-Werkzeugen benötigten Eingangsinformationen in den umfangreichen Modelldaten überprüfen zu können. Hierfür benötigen die Planenden spezielle IT-gestützte Instrumente. Im Rahmen des Forschungsprojektes stellt dieser Bedarf einen ersten Teilaspekt für die Konzeption eines weiteren Werkzeuges dar. Mit einem IFC Prüfwerkzeug wurde ein in das Forschungsprojekt eingebrachter Softwareansatz für diesen Anwendungskontext angepasst. Die Konzeption des Werkzeuges greift neben den beschriebenen, benötigten Konformitätsprüfungen für die im Rahmen der Werkzeugkette ausgetauschten Modelldaten durch Hinzunahme von Modellanalysen eine Prüfung der inhaltlich-logischen sowie baufachlichen Qualitätsprüfung auf. Damit soll es den Planenden bei der planungsbegleitenden Anwendung der Werkzeugkette zum Anbinden der LCA bzw. SBA ermöglicht werden fachliche, die Umweltwirkungen ihrer Entwurfsentscheidungen betreffende Analysen direkt bzw. auf den durch die angebenen LCA-Werkzeuge generierten und in das IFC-Modell zurückgeführten Ergebniswerte ausführen zu können. Dem Prüfwerkzeug unterliegt dabei ein regelbasierter Ansatz, zu dem für den Projektkontext gemäß den Anforderungen entsprechende Regeln entwickelt werden. Über diesen Mechanismus können sowohl der formal-strukturelle als auch der baufachliche Umfang des Werkzeugs skaliert werden. Die als Desktop-Softwareanwendungen konzipiert und prototypisch umgesetzten Werkzeuge werden nach Abschluss des Projektes der Öffentlichkeit frei zur Verfügung gestellt.

ERGEBNISSE

Durch modellbasierte Anbindung von Werkzeugen der LCA sowie der SBA an den BIM-gestützten Planungsprozess wird im Forschungsprojekt sowohl deren frühzeitige Anwendung zur Optimierung des Planungsgegenstands bezüglich seiner Umweltwirkung als auch die Vermeidung aufwändiger Nachmodellierungen zur Verbesserung der heutigen Bewertungspraxis verfolgt. Damit den Planenden auf Basis einer offenen, IFC-basierten Schnittstelle diese Instrumente an die Hand gegeben werden können, bedarf es weiterer Bausteine um diese Hilfestellung in Form einer Werkzeugkette zu vervollständigen. Indem dieser Bedarf vor dem Hintergrund von Anwendungsfällen sowohl in den frühen Planungsphasen als auch dem der Nachhaltigkeitsbewertung mit dem Schwerpunkt auf der Ökobilanz von den Forschungspartnern szenariobasiert spezifiziert wurde, konnten Anforderungen für die beiden folgend dargestellten Werkzeugentwicklungen abgeleitet werden.

Als Grundlage der beiden Werkzeuge wurde auf Basiskomponenten aufgebaut, die zur schemaneutralen Unterstützung des modellbasierten Arbeitens in einer Softwarekomponentenbibliothek entwickelt werden. Basierend auf dem .NET Framework sind sie darin mit der Programmiersprache C# implementiert und werden im Rahmen des Forschungsprojekts genutzt und weiterentwickelt (vgl. v. Both 2018). Die Werkzeuge sind für die Anwender in einer Desktopsoftwareanwendung (vgl. Abbildung 2) für Windows Betriebssysteme zusammengeführt. Beide Werkzeuge teilen sich einen ersten Arbeitsschritt zur Auswahl eines IFC Modells. In dieser Ansicht wird dem Anwender das ausgewählte Modell visuell präsentiert. Hierfür wurde die für nicht kommerzielle Softwareentwicklungen frei verfügbare Visualisierungskomponente RDF IFC Engine DLL implementiert. Damit kann neben der geometrischen Modelldarstellung auch eine Baumdarstellung der Modellelemente angezeigt werden, über die wie in Abbildung 1 dargestellt Elemente ein- und ausgeblendet bzw. hervorgehoben werden können. Als Baustein moderner, BIM-basierter Softwareanwendungen ermöglicht eine Modellvisualisierung eine wichtige erste Inaugenscheinnahme der Modelldaten durch den Anwendenden. Von dieser initialen Ansicht ausgehend wird der Anwendende entlang der Workflows der beiden Werkzeuge mit ihrer unterschiedlichen Funktionalität jeweils durch eigene Ansichten repräsentierte Arbeitsschritte geführt.

IFC Model Check Werkzeug

Mit insgesamt vier Arbeitsschritten, zusammen mit der Auswahl des Modells, befähigt das Model Check Werkzeug, das auch als Hauptwerkzeug der gesamten Software den Namen gibt, den Anwendenden zur regelbasierten Modellprüfung und -analyse. Die Schritte sind durch die vier nacheinander freigeschalteten Schaltflächen am unteren Fensterrand ansteuerbar:

- Modell wählen
- Regel wählen
- Anwenden
- Zusammenfassen

Nach der Modellauswahl werden die im Werkzeug hinterlegten Regeln zur Prüfung bzw. Analyse des Modells in einer Regelbibliothek präsentiert. Wie im vorherigen Kapitel beschrieben stehen dabei zwei unterschiedliche Regelarten zur Verfügung.

Formale strukturelle Prüfregeln bilden dabei zu den in der IFC Modellsicht definierten obligatorischen Beschreibungskonzepten entsprechende Existenzkontrollen ab. Fundamental für die Abbildung der Randbedingungen der LCA sind beispielsweise der Bezug zu im Modell verwendeten Einheiten und Bezugsgrößen. Da diese in IFC im Projektelement abgebildet werden, muß dieses vorhanden sein. Erst nach dieser grundlegenden Existenzprüfung werden die Inhalte geprüft, wie im Beispiel die weiteren im Modell vorhandenen

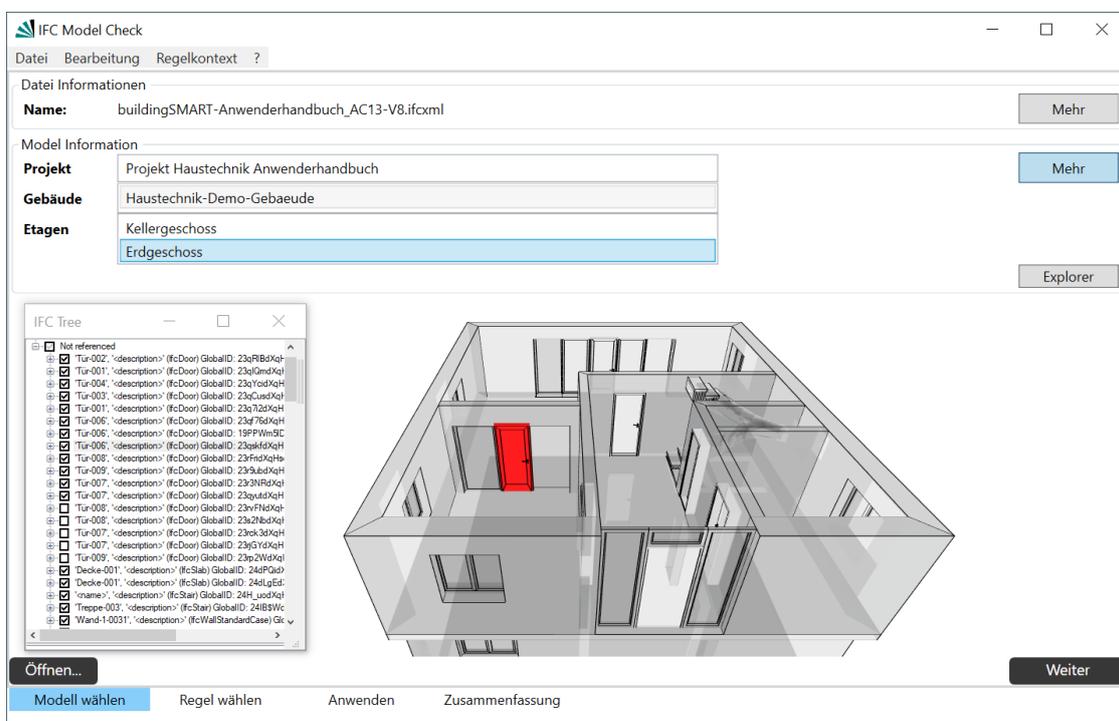


Abbildung 2: Prototyp IFC ModeCheck – Modellansichtsfenster (RDF IfcEngine DLL Viewerkomponente)

Bezugsgrößen. Neben den fundamentalen und gemäß dem IFC Schema einheitlich in der Modellinstanz abzubildenden Elementen ermöglicht das flexible objektorientierte Modellformat auch verschiedene Abbildungsarten. Mit Blick auf die Praxistauglichkeit der definierten MVD wurde diese Flexibilität weitestgehend erhalten. So ist beispielsweise möglich sowohl die einzelnen Schichten eines Wandbauteils als eigenständige Objekte mit eigenen Geometrien und Mengen- bzw. Maßangaben zu modellieren oder die Schichtinformation aggregiert dem Wandobjekt als alphanumerisches Attribut in einer Wandeigenschaft anzuhängen. Bezüglich der für die LCA relevanten Materialinformationen bedeuten diese beiden alternativen Beschreibungsverfahren, dass sie an unterschiedlichen Stellen im Modell verortet werden. Zum einen sind jeweils einzelne Materialobjekte den eigenständigen Schichten zugeordnet, zum anderen werden mit einem speziellen Aggregatselement die verschiedenen Materialien an das Wandobjekt selbst verknüpft. Das Beispiel verdeutlicht, dass die Prüfregeln, um alternative Abbildungen der Information in der Modellstruktur berücksichtigen zu können, jeweils mit den entsprechenden Existenzprüfungen zusammen ausgeführt werden müssen. Hierfür sind alle Prüfregeln in sogenannten Regelsätzen gruppiert. Indem dabei mit einer Referenz auf die in eigenständigen Dateien gekapselten Regeln verwiesen wird, kann eine Regel in verschiedenen Sätzen beinhalten sein. Damit können Prüfungen für alle in der MVD festgelegten Modellierungsfälle mit entsprechend zusammengestellten Regelsätzen abgebildet werden die den Anwendenden über ihre Bezeichner bedarfsorientiert zur Auswahl dargestellt werden.

Diese bereits innerhalb der Regelsätze aufeinander aufbauenden Prüfregeln bilden auch die Grundlage an Prüflögen für die Inhalte der Planungsmodelle, an denen Analyseregeln angesetzt werden können, wie beispielsweise zur Prüfung baufachlicher Sachverhalte. Da im Projektkontext durch einen Praxispartner für den Anwendungsfall der Gebäudebewertung bereits ein SBA-Werkzeug durch Implementierung der MVD-basierten Schnittstelle den Mehrwert des Schnittstellenansatzes im Zertifizierungsprozess am Ende der Planungsphase demonstriert, konzentriert sich die für das IFC Model Check Werkzeug im Projekt avisierten Analyseregeln auf die fachlichen Fragestellungen in den frühen Planungsphasen. Um beispielsweise im Rahmen eines Variantenvergleiches die von Seiten LCA im Planungsmodell angereicherten Umweltwirkungen zu den Varianten entsprechend vergleichend auswerten zu können. Diese ebenfalls durch ihre Bezeichner dem Anwendenden aufbereiteten Analyseregeln stehen in der Regelbibliothek der Auswahlansicht zur bedarfsorientierten Zusammenstellung einer Modellprüfung und/oder Analyse zur Verfügung.

Mit der Auswahl einer oder mehrerer Regeln wird der dritte Arbeitsschritt freigeschaltet, in dem die Regeln auf das Modell angewendet werden. Während des Vorganges informieren Ereignisnachrichten in einem Konsolenfenster den Anwendenden in Echtzeit über den Ablauf der einzelnen Regeln. Nach der Durchführung wird mit der Berichtsansicht der vierte und letzte Arbeitsschritt im Model Check zu der aktuellen Modellprüfung freigeschaltet. In einer der übersichtshalber mittels Baumdarstellung präsentierten Liste werden alle Ereignisse jeweils unterhalb des entsprechenden Bezeichners der Regel verschachtelt aufbereitet. Den Anwendenden wird es ermöglicht zu jedem Eintrag im Ergebnisbericht entsprechende Kommentare hinzuzufügen. Über eine Schaltfläche kann der Bericht in Form eines Tabellendokuments zur Weiterverarbeitung im Planungsprozess exportiert werden.

Alle Schritte des Werkzeugs können beliebig iteriert werden, wobei jeweils dem Anwender mit Warnhinweisen mitgeteilt wird, falls bereits abhängig (Teil-) Ergebnisse durch die Änderungen ungültig würden. So wird beispielsweise bei Auswahl einer weiteren Regel ein bereits zusammengestellter Ergebnisbericht gelöscht und das Berichtsfenster gesperrt bis die neue Regelauswahl auf das Modell angewendet wurde und eine entsprechend aktualisierter Bericht verfügbar ist.

IFC Model Editor Werkzeug

Zur Ergänzung der nicht mit den derzeit verfügbaren CAD-Systemen erzeugbaren Elemente der entwickelten MVD Schnittstelle im IFC-Modell wurde im Rahmen des Projektes ein weiteres Werkzeug entwickelt. Aufgrund der oftmals sehr umfangreichen BIM-Modelle, wurde dabei im Gegensatz zum Einlesen des gesamten Modells in den Speicher des Rechners, wie es beim Model Check Werkzeug realisiert worden ist, eine Zwischenspeicherung in einer nativen XML-Datenbank als Bearbeitungsspeicher umgesetzt. Dies ermöglicht es große Datenmodelle nach einmaliger aufwändiger Ablage in der Datenbank sehr performant zu bearbeiten. Die hinterlegte Manipulationslogik ist dabei im offenen Abfrageskriptstandard XQuery verfasst. Mittels der Update Komponente in diesem Standard können die Datenmanipulationen beschrieben werden. Da es sich im Rahmen des Forschungsprojektes bei den Editierungsmöglichkeiten um ergänzende, randständige Eingriffe in ansonsten im BIM-Autorensystem modellierten BIM-Modell handelt, wurde die Eingabemaske in der Benutzeroberfläche für die einzelnen Anpassungsfälle, wie das Hinzufügen einer Katalogreferenz, sehr schlicht und formularartig gehalten. Zu besserer Orientierung ist die Oberfläche des Werkzeuges in die ebenfalls im Modellansichtsfenster befindlichen Modellexplorer integriert (vgl. Schaltfläche *Explorer* in Abbildung 2). Damit wird dem Anwendenden ein schnelles Ein- und

Ausblenden der Modellvisualisierung zu ggf. erforderlichen Orientierung im Modell ermöglicht. Der Modellexplorer selbst ermöglicht das Typbezogene Abfragen der Modellelemente sowie deren Abbildung in einer Baudarstellung. Nachdem der Anwendende mit dem Explorer zu einem bestimmten Modellelement navigiert hat, können spezifische Manipulationsfunktionen für das Element im Model Editor Werkzeug mit dem Wechsel in den Editiermodus eingeschaltet werden. Wenn beispielsweise auf ein Materialobjekt navigiert wurde, kann diesem mit dem Model Editor über die entsprechende Schaltfläche ein Katalogreferenz zur Materialklassifikation hinzugefügt werden bzw. diese abgeändert werden. Die mit dem Werkzeug ermöglichten Anpassungen befähigen die Planenden ihre Modelle für die Verwertung in den Werkzeugen der LCA bzw. SBA vorzubereiten. Es bildet derzeit noch einen wichtigen Baustein in der Werkzeugkette, dessen Aufgabe langfristig durch eine intendierte Implementierung der MVD Schnittstelle im Zuge ihrer Standardisierung in weiteren Autorenwerkzeugen, von diesen übernommen werden könnte.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Beitrag wurden die im Rahmen eines Forschungsprojektes prototypisch umgesetzten Werkzeuge für eine darin ebenfalls entwickelte IFC Schnittstelle vorgestellt. Die Werkzeuge werden nach Beendigung des Forschungsprojektes zusammen mit der ebenfalls entwickelten IFC Modellsicht als standardbasierte Datengrundlage frei zur Verfügung gestellt¹⁸. Als Teil einer Werkzeugkette, die die Werkzeuge der LCA und SBA modellbasiert an die BIM-basierten Planungsgegenstände anbindet, fügen sie sich zu einem Planungshilfsmittel für Aspekte der Ökobilanz. Dabei ermöglicht eine der Schnittstellenbeschreibung unterlegte Systematik die durchgängige prozessbegleitende Abbildung und Verknüpfung LCA-relevanter Daten. Forschungsseitig kann mit den Werkzeugen das Anwenden der LCA-Werkzeuge schon zu den frühen Planungsphasen demonstriert werden, in denen die Kenntnis über die Umweltwirkung der (Entwurfs-) Entscheidungen auf die spätere Performance des

Gebäudes noch den größten Impact bei gleichzeitig geringsten Kosten darstellt. Als Beitrag zu der derzeit noch nachgelagerten Praxis der Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden kann mit den Tools ein Mehrwert einer BIM-basierten Anbindung der LCA bzw. SBA in einer auf Standards beruhenden modellbasierten Arbeit aufgezeigt werden. Ein bisher aufwändig mit tabellenstrukturierten Daten bewerkstelligter Bewertungsprozess kann damit signifikant optimiert und für alle Beteiligten wertsteigernd verbessert werden.

DANKSAGUNG

Das dem Beitrag unterliegende Forschungsprojekt wird durch das Bundeswirtschaftsministerium aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages gefördert.

LITERATUR

- von Both, P. (2011): Aktuelle Ansätze zur Unterstützung interdisziplinärer Zusammenarbeit im Bauwesen, In: Banse und Fleischer (Hrsg.): Wissenschaft in Kontext. Inter- und Transdisziplinarität in Theorie und Praxis, trafo Wissenschaftsverlag, Berlin 2011.
- von Both, P., Ebertshäuser, S. (2018). BIM-basierte Hilfsmittel für eine integrale Planung. In C. M. Achammer & I. Kovacic (Hrsg.), *Construction Goes Digital*. Wien: Klein Publishing GmbH
- Gantner, J. et. al. (2018): Ökobilanz – Integration in den Entwurfsprozess. BAUPHYSIK Sonderausgabe, ernst und sohn, Berlin, Germany. S.286- 297. (DOI: 10.1002/bapi.201800016; ISSN: 0171-5445).
- Rexroth, K. et. al. (2018): Ein Ansatz für die typologiebasierte Vervollständigung von Gebäudeinformationen zur Unterstützung der frühen Planungsphasen am Beispiel LCA. BauSIM 2018 - Tagungsband der 7. Deutsch-Österreichischen IBPSA Konferenz, Karlsruhe, Germany. S.76-84. (DOI: 10.5445/IR/1000085743).

¹⁸ Die Tools werden zum Download auf der KIT- BLM Webseite bereitgestellt: <https://download.building-lifecycle-management.de/>

Usability evaluation of a building simulation web-based design guide on potential user group

R. Jayapalan Nair¹, E. Brembilla¹, C. Hopfe², J. Mardaljevic¹

¹School of Architecture, Building and Civil Engineering, Loughborough University, UK

²Building Physics Group, Graz University of Technology, Graz, Austria

ABSTRACT

The paper summarises the results of a usability testing exercise for a new building performance simulation based guide. The guide, presented via a web-based platform, aims to aid practitioners and policymakers during the early-design stages to achieve higher thermal and daylight performance. This study in two parts focuses on: understanding the usability of the contents of the guide; and, evaluating the design issues associated with the guide's web-platform. The results of the usability testing show that the participants generally perceived the design guide easy to use and valuable during early-stages of design. Furthermore, the participants provided suggestions on areas for possible future improvements.

INTRODUCTION

The International Energy Agency (IEA) estimates that, of the total housing stock that would exist in India by 2030, only one-fourth has been built as of 2015 with the rest yet to be constructed (IEA, 2015). This is in contrast to developed continents such as Europe and North America. The energy use in the residential building sector in India is expected to undergo a drastic change with an anticipated rise of about 65% to 75% of 2005 levels by 2050 (van Ruijven et al., 2011). Thus, regulating the performance of buildings becomes an increasingly important consideration.

In India, the construction of buildings is governed by building codes and regulations enacted by governmental departments at national and state levels. The national level building codes and rating systems like the National Building Code of India (NBC), Energy Conservation Building Code of India (ECBC), Green Rating for Integrated Habitat Assessment (GRIHA) etc. are non-mandatory and ineffective at state and local levels (Chandel et al., 2016). The State Government ultimately decides on all matters concerning land and its development, hence any proposed reform of existing building regulations should focus on State legislation and should be tailored for the specific State's needs.

In Kerala, one of the 29 states in India, the construction of buildings is governed by Kerala Municipality Building Rule (LSGD, 2019a) and Kerala Panchayat Building Rule (LSGD, 2019b). The latest update (2019) of these building rules does not provide any

measure to ensure energy efficiency in the construction of new residential buildings. Meantime, as part of the Government's vision to provide housing for all, a project titled "Livelihood Inclusion and Financial Empowerment (LIFE) mission" is being implemented. Under this project, the Government of Kerala plans to build more than 750,000 houses (Issac, 2018). The beneficiaries (i.e. the people of the State) are free to choose from among 12 proposed designs which will be used for the construction of buildings, irrespective of the location or climate. A number of previous studies (Jayapalan Nair et al., 2018, 2019) identified regions in Kerala with different climate characteristics and suggested that designs should be tailored for the different climate zones.

Currently there are no guidelines provided in the State's building codes to ensure energy efficiency in the construction of new residential buildings. Thus, a new building performance simulation (BPS) based design guide was developed to remedy this short coming. The guide aims to assist practitioners and policymakers during early-stage design to achieve higher than typical/average thermal and daylight performance. This paper is organised into three parts. The first part gives a brief description of the guide. The second part describes the methods used to assess the usability of the guide. The last part presents the results of the usability testing.

DESCRIPTION OF THE GUIDE

The guide, based on the users, preferences/constraints, provides the building performance measure (i.e. the annual energy demand and/or the Useful Daylight Illuminance values) and a corresponding list of sensitive parameters (and their values). The guide is presented via a web-based platform. Users can navigate the website by going through six main steps, in which they are asked to select design parameters based on either site constraints or design choices.

The Home (welcome) page of the website gives an overview of these six steps and provides video tutorials. The six steps are as follows:

Step 1: Select the location

In the first step, the user is asked to select the location of interest. The selection of the location informs the

user of the determined the climate zone and suggests building designs tailored for those climatic conditions.

Step 2: Select the building context

The second step is to select the building context. Here the user is asked to select whether the building is planned to be constructed in an open low-rise (rural), dense low-rise (urban) or dense high-rise context.

Step 3: Select the building base form

The designs provided in this guide are for three base-forms (see Figure 1) and in the third step, the user is asked to select one of these.

Step 4: Select the orientation of the building

The fourth step is to select the orientation of the building. The main entrance door is used as the reference to define the building's orientation.

Step 5: Select the building's design priority

Once the orientation is selected, the next step is to select the building's design priority which could be - high thermal and/or daylight performance. The thermal and daylight performance of the designs were assessed based on the annual energy demand for heating and/or cooling and the Useful Daylight Illuminance metrics (Mardaljevic, 2015) respectively.

The performance of the designs were categorised into better, medium and worse based on the results of an Uncertainty Analysis (UA) performed using a Latin Hypercube sampling procedure (Hopfe and Hensen, 2011). For the UA, a number of design parameters including Window-Wall Ratio (WWR) for different facades, U-values and optical properties of the main building elements were considered (Jayapalan Nair et al., 2020). A total of 750 design variations, 250 for each of the different building base-forms were investigated.

Figure 2 shows the results of the UA for thermal and daylight performance for the three building base forms, when oriented towards the South direction and located in the city of Thiruvananthapuram. In Figure 2a and 2b, the box and whisker plots show the 25 and 75 percentile values of annual energy demand (kWh/m²) and Useful Daylight Illuminance-combined metric (UDI-c), respectively. These values were used to define performance thresholds. The annual energy demand value corresponding to the lowest 25th percentile from among the three base-forms was defined as the lower energy threshold and that corresponding to the 75 percentile as upper energy threshold. The designs having an annual energy de-

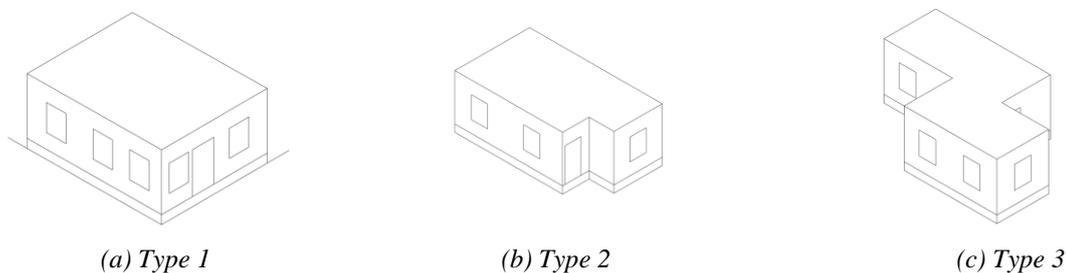


Figure 1: The three base-form building types presented in the guide.

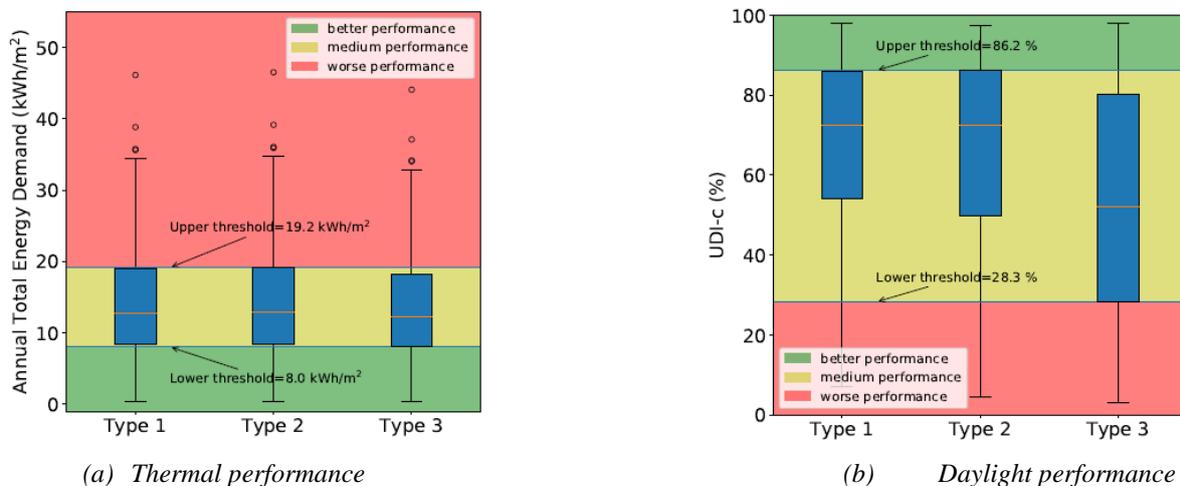


Figure 2: Results of Uncertainty Analysis for the different base-form building types when located in the city - Thiruvananthapuram. The upper and lower threshold values were used to categorise designs into better, medium and worse performance.

mand below the lower threshold were categorised as showing better thermal performance. The designs exhibiting an annual energy demand higher than the upper threshold were categorised as showing worse thermal performance. All other designs were categorised as showing medium thermal performance. The same applies to the categorisation of daylight performance (see Figure 2b).

To select the design priority, the user is provided with three options: thermal, daylight and combined. If thermal is selected, the user is taken to the next step where all the designs showing better thermal performance (i.e. total energy demand below the lower threshold value) are provided. The same applies for daylight and combined (better thermal and daylight) options.

Step 6: Select the building's design parameters

The selection of the design priority leads the user to the design selection page where design variations are presented using a parallel coordinates plot. The parallel coordinates plot is a type of data visualisation method that is ideal for comparing a number of variables (e.g. WWR, U-values, etc.) and outcomes (e.g. thermal and daylight) based on a particular design (Figure 3). Each variable (design parameter) is given its own vertical axis. A Sensitivity Analysis (SA) - based on the Morris method (Saltelli et al., 2004) and performed on the same design parameters considered for the UA { allowed the selection and inclusion in the parallel coordinate plot of only the most sensitive parameters. Each axis is placed parallel to each other and have different scales. The values across the axes are interconnected by a series of lines. Each line represents one design option linking together the corresponding design parameters and performance results.

The parallel coordinates plot allows the user to filter out the design based on their preferences/goals. Figure 3 shows the parallel coordinates plot, without and with filtering applied, for a design that has a WWR for a specific wall less than 40 %, a floor U-value be-

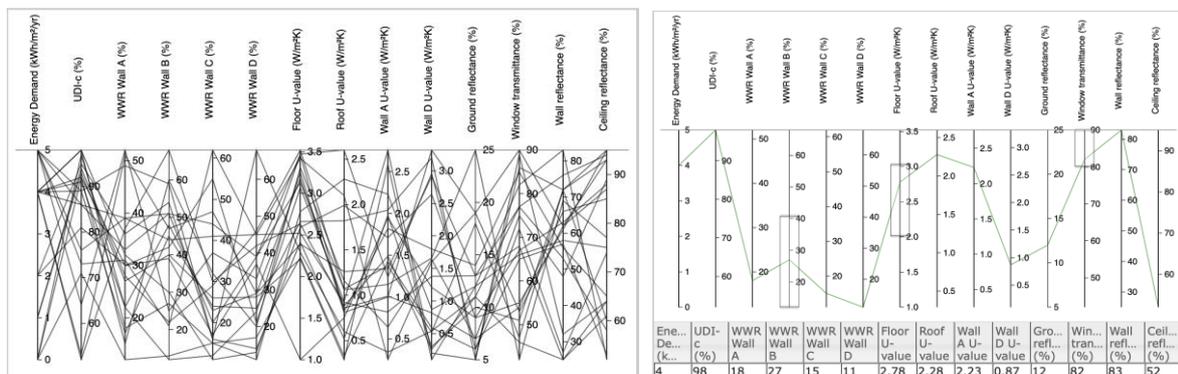
tween 2 and 3 W/m² and a window transmittance value greater than 80%.

From the design selection page the users have the option to download the design report. The report provides details such as (a) executive summary, (b) brief background, (c) description of climate of the selected location, (d) details of the selected design and its thermal and daylight performance details, and (e) a technical reference section describing the simulation methods and assumptions used with details of UA and SA carried out to identify the performance thresholds and sensitive design parameters.

The design guidelines provided are based on pre-run simulations and are expected to give guidance during the early stages. This will help reduce the uncertainties related to the experience and level of expertise of designers as perceived by the wider building simulation community (Mahdavi, 2020), especially in Kerala's context where regulation does not recommend energy efficiency measures. Also, in the context where no guidelines are provided in Kerala's building codes, the threshold values for thermal and daylight performance provide benchmark targets as goals for for experienced designer/modellers.

The simulations were carried out based on certain assumptions regarding occupant behaviour and HVAC operations. The details regarding these are provided in the design report. If there are any significant differences with respect to the simulation assumptions, it is expected that the user will re-run the required simulations at the final stage of the design process to estimate the building's performance. Even then there may be a gap between the estimated (in final design stage) and the actual building performance due to uncertainties in construction, occupant behaviour and/or external boundary conditions.

Usability testing is a fundamental step in assessing the experiences of the potential user/target group and previous studies (Hopfe and Hensen, 2009) have shown that these evaluations are very important with



(a) Parallel coordinates plot - without filter.

(b) Parallel coordinates plot - with filter.

Figure 3: Screenshot of parallel coordinates plot from the website.

BPS to ensure that such a tool will be accepted at the early design stage. This study aims to: (a) identify potential design/navigation issues that could affect the experience of using the guide's web platform and (b) understand the usability of the contents of the design guide to assist users during the early design-stages.

METHODS

The usability evaluation of the guide was divided into two parts. In the first part, the usability was assessed by carrying out a user experience testing to identify issues associated with the user interaction/navigation of the website. In the second part, the usability was assessed through an expert review to evaluate the quality of contents of the guide in providing assistance during early-stages of building design.

User experience testing of the website

The first part of the evaluation focused on assessing the usability of the website. The participants were recruited using criteria sampling method (Gray, 2018). The intended user group was architects and engineers. Thus, the same professional background was set as selection/recruitment criteria for the participants. The recruited participants all had less than five years of experience. Thus, they were categorised as early-career practitioners.

The usability was measured in accordance with the definition of usability provided in the ISO 9241 standard. The ISO standard defines usability as "the extent to which a system, product or service can be used by specified users to achieve specified goals with effectiveness, efficiency and satisfaction in a specified context of use" (ISO, 2018). The effectiveness of the website was measured by determining the task completion/success rate and identifying the associated errors (count). The tasks for the early-career practitioners were designed to represent the most important/frequent real world scenarios that users may encounter when using the website. Task's were as follows:

Task 1: Select Thiruvananthapuram as your location;

Task 2: Chose an open low-rise building context;

Task 3: Select form Type 1;

Task 4: Change the orientation to facing true South;

Task 5: Select the design priority as thermal performance.

Task 6: Filter the designs with a WWR less than 40 %;

Task 7: Filter the designs with a floor U-value between 2 and 3 W/m²;

Task 8: Filter the designs with a window transmittance value greater than 80%;

Task 9: Download the executive summary of the design report.

Furthermore, the participants were asked to talk through the different steps to identify issues in the process of using the website.

The participants were asked to use their own personal computers to avoid introducing usability factors related to unfamiliar hardware. This also revealed any issues associated with monitor size, screen resolution and browser compatibility. It is normal to include completion times in any usability assessment. However, as participants accessed the website from different locations, the task completion time was affected by the varying internet connection time and hence not noted.

User satisfaction with carrying out the tasks was measured with the help of scores derived from a post-task user satisfaction questionnaire. The user satisfaction score was measured using a five-point Likert scale (0- strongly disagree, 1- disagree, 2- neither disagree nor agree, 3- agree and 4- strongly agree) (Likert, 1932). To calculate the mean satisfaction score, for positive oriented questions, the response of strongly disagree was given the minimum score of zero and the response of strongly agree was given the maximum score of four. For the negative oriented questions, the response of strongly disagree was given the maximum score of 4 and the response of strongly agree was given the minimum score of zero.

Expert review of the guide

The second part of the evaluation focused on the expert review of the contents of the guide. The semi-structured interview was used to gain greater understanding of the usability issues associated with the content of the guide. The participants were recruited using an intensity sampling method (Gray, 2018) based on their expertise. This allowed the gathering of valuable information to understand and improve the usability of the guide. Based on background and experience, the participants were categorised into two groups:

1. **Policymakers** (seven participants): Politicians, architects, engineers and building physicists who are involved in policy-making on behalf of the Government of Kerala;
2. **Experienced practitioners** (nine participants): Senior architects and engineers having more than 20 years of experience (and not involved in policy making).

The effectiveness of the guide was assessed by defining a number of tasks and measuring the task success rates. Task's 1-5 were the same as those performed for the user experience testing. For Task 6, the experts were asked to select their preferred design and download the report.

The efficiency and satisfaction was measured simultaneously by organising a semi-structured interview around a post-task user satisfaction questionnaire.

RESULTS AND DISCUSSION

User experience testing of website

To understand the issues associated with the ease of navigation through the website, a usability testing exercise was carried out with early-career practitioners. For this, the participants were asked to navigate through the website carrying out a number of tasks.

Table 1 presents the results of the exercise. Out of the nine tasks, the first five tasks were completed successfully by all the participants. Out of the 11 participants, one opted out at the sixth task, which involved filtering out a design based on a certain criteria. Thus for that participant, the remaining tasks were marked as not completed/unsuccessful. For tasks 6, 7, 8 and 9, the task success rate is 73 %. For these tasks, the participants who made an error (n=2), filtered out the wrong design. The reason reported by these participants were that they did not read the task carefully.

To further understand the user experience in using the

website, the participants were asked to fill in a post task questionnaire. Figure 4 presents the user satisfaction scores of this exercise. The mean satisfaction score was 2.98 out of 4, very close to 'Agree'. To identify the issues associated with the ease of navigation, the results of the user satisfaction score were analysed together with the verbal comments. The lowest score (2.64) was observed for the statement "I found it easy to select the desired design" (Figure 4). Some participants, though they had successfully completed the tasks (Tasks 6-8), mentioned that it was their first experience with parallel coordinates plot and that they were not aware of the filtering option until they watched the video provided on the webpage. The website design was revised according to these findings.

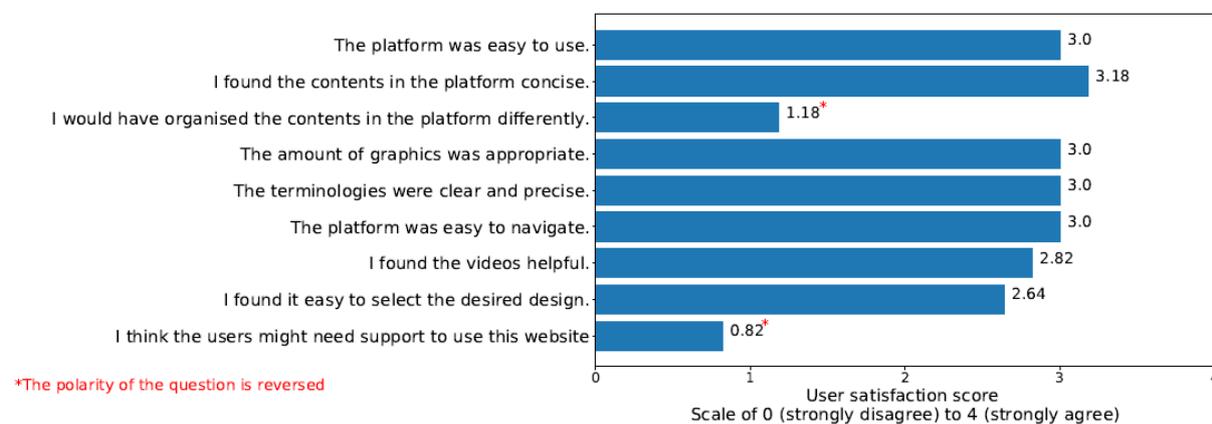
Expert review of the guide

Expert review was carried out to inform about the quality of the contents of the guide. The task (successful) completion rate for all the participants was

Table 1: Results of website usability testing exercise.

Task*	Task success rate (%)	Error description	Reason(s) expressed by participant
Task 1	100%	-	-
Task 2	100%	-	-
Task 3	100%	-	-
Task 4	100%	-	-
Task 5	100%	-	-
Task 6	73%	1. Unable to apply filter (n=1). 2. Incorrect filtering range (n=2).	1. Don't know how to apply filter (n=1). 2. Don't know how to remove filter (n=1). 3. Did not read the task carefully (n=1).
Task 7	73%	1. Discontinued at Task 6 (n=1). 2. Incorrect filtering range (n=2).	1. Don't know how to apply filter (n=1). 2. Did not read the task carefully (n=2).
Task 8	73%	1. Discontinued at Task 6 (n=1). 2. Incorrect filtering range (n=2).	1. Don't know how to apply filter (n=1). 2. Did not read the task carefully (n=2).
Task 9	73%	1. Discontinued at Task 6 (n=1). 2. Downloaded the wrong executive summary (n=1). 3. Downloaded the design report instead of executive summary (n=1).	1. Don't know how to apply filter (n=1). 2. Did not read the task carefully (n=2).

n - number of participants. * detailed description of the tasks is presented in the methods section.



*The polarity of the question is reversed

Figure 4: User satisfaction score based on usability testing for website.

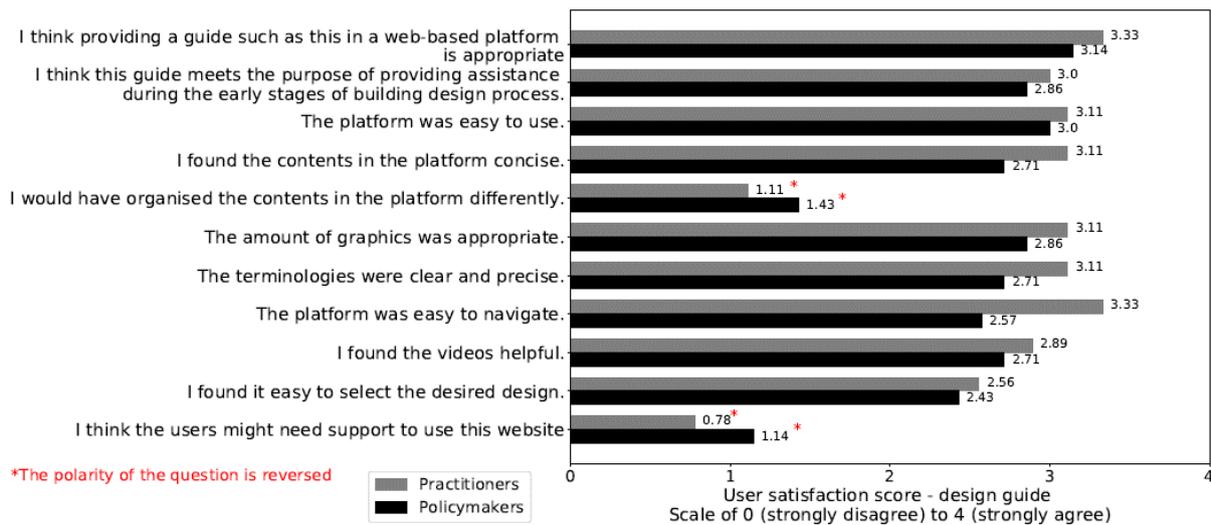


Figure 5: User satisfaction score based on expert review for guide.

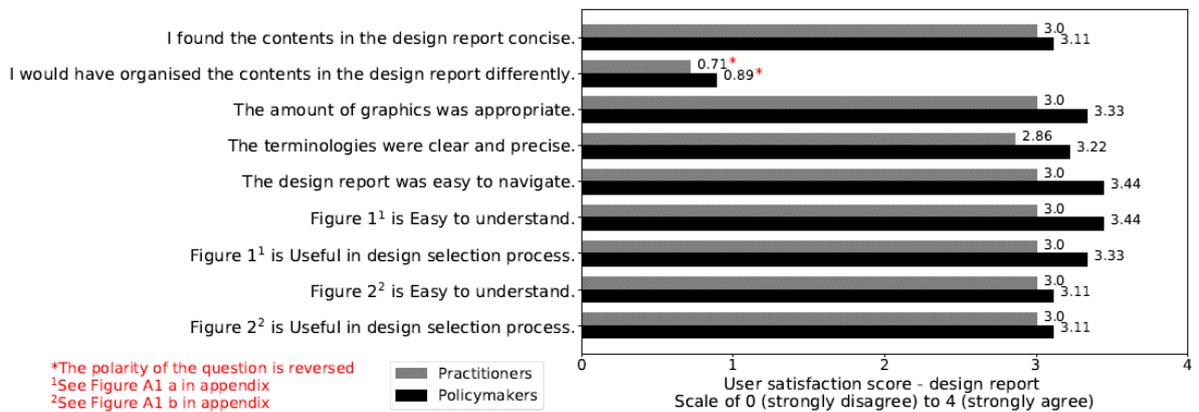


Figure 6: User satisfaction score based on expert review for report.

100 %. Figure 5 and 6 present the results of the user satisfaction questionnaire for the guide and the report, respectively. Studies have shown that in Agree-Disagree questionnaires, participants have a tendency to select the agree option disproportionately more often than disagree option and this can lead to incorrect conclusions (Krosnick and Fabrigar, 2001; Saris et al., 2010). Thus to control the acquiescence bias, the questionnaire had positive and negative oriented statements.

The mean satisfaction score for the guide was very close to three (2.91 out of 4) with the score from practitioners being 3.06 and policymakers being 2.77. The mean satisfaction score for the report was also very close to three (3.02) with the score from practitioners being 3.11 and policymakers being 3.20.

From the results, it is evident that practitioners were comparatively more satisfied with the guide than policymakers (Figure 5) whereas when it comes to user satisfaction score for the report this is reversed (Figure 6). The analysis of the verbal comments provided

further information on why there was this slight difference. Table 2 summarises the major issues and recommendations reported by the participants as part of the expert review process.

From Table 2, it can be observed that the policymakers found the design report as containing too many technical details/terms, and wanted the guide to present the contents in a simpler way which would be understood by the general public. The policymakers intended to use the report to state the problem being addressed and provide clear solution and policy recommendations based on quality evidence. The technical details were not of much interest as they were not subject specialists.

The practitioners, on the other hand, were interested in the technical details but mentioned that the report was too lengthy. They found that the background information provided in the design report was unnecessary as they were more interested in the knowing the design parameters and recommendations. The practitioners intend to use the report to compare between

Table 2: Major issues and recommendations reported by policymakers and experienced practitioners during the expert review process.

Aspects	Reported issues/ recommendations	P	EP
Guide (website)			
Visual appearance of the guide and amount of information provided.	Website contains a lot of technical details. Present the contents in a simpler way which would be understood by the general public.	2	-
	Model designs for each zone. That would make it easier for policymakers and people in administration.	2	-
	Provide details of available materials and their properties in the website.	-	2
	The parallel coordinates plot for selecting the design is confusing.	-	2
	A need to improve the visual appeal of the website.	-	2
	Provide details as to which orientation is the best?	1	-
Omitted aspects that should be incorporated later (if possible).	Provide the cost of construction for each of the designs.	2	-
	A need to consider the supply side as well.	2	-
	Provide details of electrical appliances and their ratings, retrofitting options, net-zero design options, management and maintenance policy, type of construction to be considered after a disaster (disaster-resilient buildings), factors to be considered by tenant and landlord (upfront cost and running cost), urban heat island effect.	1	-
	Provide comparisons to vernacular architecture.	-	2
	Consider human-centric designs as one of the design parameters.	-	1
Report			
Visual appearance of the guide and amount of information provided.	A need to reduce the amount of text (background information not required).	-	4
	Provide details of available materials and their properties in the report.	-	3
	Provide details from Kerala's building code in the report.	-	1
	Similar to the website, the report also contains a lot of technical details.	1	-
Omitted aspects that should be incorporated later (if possible)	Provide the cost of construction for the selected design.	1	-

P - Number of Policymakers; EP - Number of Experienced Practitioner

different design options, and select the most appropriate one. As a solution to the revealed differing preferences, a separate download option for an executive summary and a detailed design report are now provided on the redesigned website.

Though some of the other user recommendations, such as considering human centric designs as one of the design parameters and providing details of net-zero design options (considering the supply side), fall beyond the scope of this research, they are identified as useful and important areas for further research.

The provision of the guide through a web-based platform makes it convenient to update it as and when progress is made in the recommended future research areas.

CONCLUSION

The usability testing of BPS is considered important as it helps to ensure that such a tool will be accepted at the early design stage by potential user group(s).

This study conducted a usability assessment exercise to understand issues and identify areas of improvement for a building design guide that aims to assist practitioners and policymakers during the early stages of design of high performing residential buildings. The guide is presented via a web-based platform. The first part of the study focused on an expert review with policymakers and experienced practitioners to assess the quality of the contents of the guide.

The participants response was largely positive with the mean user satisfaction score being very close to 3

(agree) on a 0-4 Likert scale.

To understand the user experience while navigating the website, a separate exercise was carried out with early-career practitioners. Results also showed an overall positive mean user satisfaction score very close to 3 (agree) for the ease of use/navigation. The usability assessment also made it possible to identify some areas for improvement of the guide. The results of both the exercises, expert review and usability testing, showed that participants generally perceived the design guide as easy to use and valuable during the early building design stages. In the context that more than 750,000 houses will be built in Kerala in the near future and currently no guidelines are provided in Kerala's building code(s) to regulate the construction of energy efficient residential buildings, it is hoped that this tool will aid the design of buildings that exhibit higher thermal and daylight performance.

ACKNOWLEDGEMENT

Mr. Jayapalan Nair acknowledges the support provided by KIIDC, Habitat Technology group and Loughborough University. Dr. Brembilla and Prof. Mardaljevic acknowledge the support of Loughborough University.

REFERENCES

- Chandel, S. S., A. Sharma, and B. M. Marwaha (2016). Review of energy efficiency initiatives and regulations for residential buildings in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54, 1443-1458.
- Gray, D. E. (2018). *Doing research in the real world* (4th Edition ed.). Sage Publications Limited.
- Hopfe, C. and J. Hensen (2009). Experiences testing enhanced building performance simulation prototypes on potential user group. In *11th IBPSA Building Simulation Conference*.
- Hopfe, C. J. and J. L. Hensen (2011). Uncertainty analysis in building performance simulation for design support. *Energy and Buildings* 43 (10), 2798 - 2805.
- IEA (2015). India energy outlook: World energy outlook special report. *International Energy Agency*.
- ISO, M. (2018). Ergonomics of human-system interaction - part 11: Usability: Definitions and concepts.
- Issac, T. T. M. (2018). Budget speech 2018-2019. Technical report, Ministry of Finance, Government of Kerala.
- Jayapalan Nair, R., E. Brembilla, C. J. Hopfe, and J. Mardaljevic (2018). Influence of climate on the daylight and thermal performance of buildings in Kerala (India). In *Building Simulation and Optimisation. IBPSA*.
- Jayapalan Nair, R., E. Brembilla, C. J. Hopfe, and J. Mardaljevic (2019, September). Weather data for building simulation: Grid resolution for climate zone delineation. In *16th International Building Simulation Conference, Rome, Italy. IBPSA*.
- Jayapalan Nair, R., E. Brembilla, C. J. Hopfe, and J. Mardaljevic (2020, April). Influence of building design on occupant comfort in adaptive climate zones. In *11th Windsor conference, Windsor castle*.
- Krosnick, J. A. and L. R. Fabrigar (2001). Designing good questionnaires: Insights from psychology.
- Kumar, A. (2016, December). Impact of building regulations on Indian hill towns. *Housing and Building National Research Center (HBRC) Journal* 12, 316 - 326.
- Kumar, A. and Pushplata (2013, December). Building regulations for environmental protection in Indian hill towns. *International Journal of Sustainable Built Environment* 2, 224 - 231.
- Likert, R. (1932). A technique for the measurement of attitudes. *Archives of psychology*.
- LSGD (2019a). Kerala municipality building rules 2019. Technical report, Local Self Government Department, Government of Kerala.
- LSGD (2019b). Kerala panchayat building rules 2019. Technical report, Local Self Government Department, Government of Kerala.
- Mahdavi, A. (2020). In the matter of simulation and buildings: some critical reflections. *Journal of Building Performance Simulation* 13 (1), 26 - 33.
- Mardaljevic, J. (2015, April). Climate-based daylight modelling and its discontents. *CIBSE Technical Symposium, London, UK*, 16 - 17.
- Saltelli, A., S. Tarantola, F. Campolongo, and M. Ratto (2004). *Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models*, Volume 1. Wiley Online Library.
- Saris, W., M. Revilla, J. A. Krosnick, and E. M. Shaffer (2010). Comparing questions with agree/disagree response options to questions with item-specific response options. In *Survey Research Methods*, Volume 4, pp. 61 - 79.
- van Ruijven, B. J., D. P. van Vuuren, B. J. M. de Vries, M. Isaac, J. P. van der Sluijs, P. L. Lucas, and P. Balachandra (2011). Model projections for household energy use in India. *Energy Policy* 39, 7747 - 7761.

XVI: Calibration of models and data driven techniques

CALIBRATION OF DOMESTIC HOT WATER SYSTEM SIMULATIONS WITH STOCHASTIC PROFILES

A. Bres¹

¹AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Center for Energy, Vienna, Austria

ABSTRACT

Calibration makes it possible to reduce uncertainties in simulations. While a number of techniques have been proposed to achieve this in the context of building and system simulation, they have mostly been applied to static building or system parameters, rather than parameters related to occupant-driven loads. This paper investigates calibration in the presence of stochastic behavioral models for domestic hot water demand. With such stochastic models, simulation outputs and measurements should be aggregated to facilitate comparison. The paper shows in which measure parameters used in stochastic behaviour models can be calibrated in a Bayesian setting using such aggregation.

INTRODUCTION

Occupant behaviour models

From the point of view of building performance simulation, energy consumption in buildings can be considered to be a function of weather and static parameters (e.g. related to building physics) but also parameters related to occupant behaviour. The representation of occupant behaviour in building simulation tools ranges from simple static schedules to a variety of sophisticated models (Yan et al., 2015). Stochastic methods have been proposed to account for randomness and dynamic interactions in occupant behaviour, for instance for the modelling of occupancy or plug loads in buildings. Stochastic occupant models are not effective in all cases (Tahmasebi, 2016), and the purpose of simulation should be taken into account when selecting an occupant behavior model (Gaetani et al., 2016). In the context of building performance optimization, a recent contribution showed that the use of stochastic occupant behaviour models could yield different, more robust results (Ouf et al., 2020). The simulation of system controls performance is arguably a use case in which stochastic models could be useful, by allowing the robustness of controls to be assessed better than with static profiles. What is more, hot water demand is a particularly variable aspect of occupant behavior, with discrete and mostly short events which may hardly be represented with static profiles.

Calibration methods

Calibration, which we define as the adjustment of input parameters for a better agreement of simulation with empirical data, is an important step to ensure or improve the quality of simulations when measurements are available. A distinction can be made between manual calibration methods, which mostly rely on user experience or intuition, and automated calibration methods (Coakley et al., 2014). Automated calibration methods may for instance use mathematical optimization to minimize a function corresponding to discrepancy between measurements and simulation (Sun & Reddy, 2006). An alternative to optimization-based calibration is Bayesian calibration, which makes it possible to quantify uncertainties in calibration parameters, as well as discrepancies between model predictions and observed values and observation errors (Kennedy & O'Hagan, 2001). This calibration method has increasingly been applied to building simulation in the last years (Chong et al., 2017; Heo et al., 2012). The measured values y are assumed to follow Equation (1), where ζ is the true function of (known) input parameters x , ϵ is measurement error, θ is the true value of the calibration parameters t , η is the model function of x and t , and δ represents model discrepancy.

$$y(x) = \zeta(x) + \epsilon = \eta(x, \theta) + \delta(x) + \epsilon \quad (1)$$

When calibrating building simulation against hourly measurements in such as Bayesian setting, consideration should be given to the choice of which values y to use, especially as using all available hourly values may result in massive computational costs (Chong et al., 2017; Remmen et al., 2019).

Although a wide range of calibration techniques are available, their application as reported in the literature generally is mostly limited to the calibration of static parameters only.

Metrics, aggregation and uncertainty

Building performance simulation typically yields large amounts of results, mostly in the form of temporally (time steps) and spatially (zones)

differentiated physical variables. The analysis of simulation results usually involves the aggregation of such results into meaningful indicators. In the context of calibration, the goodness of fit can be quantified with metrics such as the normalized mean bias error or the coefficient of variation of the root mean squared error defined in Equation (2), where s_i and y_i represent the simulated and measured quantities at different time steps, respectively.

$$CVRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (s_i - y_i)^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i} \quad (2)$$

It is generally acknowledged that the difficulty of calibration increases with shorter time scales. This is reflected in the acceptance criteria defined in ASHRAE Guideline 14 (ASHRAE, 2002), which require calibrated models to have CVRMSE under 15% for monthly values or 30% for hourly values. Similarly, uncertainty of building performance with behaviour models has been shown to depend strongly on the spatio-temporal scale at which results are compared (Yao, 2020).

Research question

Using calibration techniques in the context of stochastic occupant models raises some questions which this paper proposes to address. Directly comparing time series of stochastically determined quantities appears questionable, if not hopeless, because of the high uncertainty of results at the temporal scale of a sub-hourly simulation time step, even for known parameters. In this context, how can simulation outputs and measurements be aggregated in order to make comparison and calibration possible, and in which measure can non-static parameters used in stochastic behaviour models be calibrated?

METHOD

Approach

Given the difficulty to compare time series directly, the approach taken here is to transform the measured or simulated time series in such a way as to reduce the randomness and then perform the comparison and calibration based on the transformed data.

Simulation model

The approach is applied to simulations combining a physical model of hot water storage and stochastic models for domestic hot water demand in single-family houses served by district heating. Reliable data about both the demand and the physical system are required when trying to optimize system behavior (for instance to limit return temperatures). The storage tank and its hysteresis control make it

impossible to observe hot water demand directly, and consequently to validate demand profiles without considering the storage system.

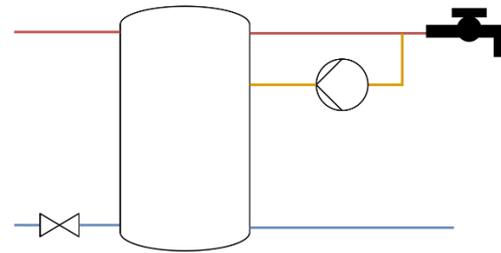


Figure 1: High-level diagram of the simulated system, with primary side on the left and secondary side on the right

The system is modelled with the general-purpose language Modelica, using the Modelica IBPSA library (*Modelica IBPSA library*, 2020) and the Modelica DisHeatLib library (*Modelica DisHeatLib library*, 2019). Central to this system is the hot water storage tank, which is modelled as a stratified tank with 4 volume segments. Simulations are carried out with the Dymola software, calling the simulation engine from Python using the BuildingsPy package (Wetter & USDOE, 2019). Both physical parameters (related for instance to the tank and its stratification) and stochastic demand parameters are subjected to uncertainties.

Stochastic hot water demand

While space heating loads to a large extent depend on weather conditions and building physics, loads from hot water consumption are much more dependent on occupant behavior, and characterized by a high time variability. They are accordingly difficult to predict and model. In addition to system-related information, inputs required for the modelling of loads from hot water consumption include mains water temperature, hot water temperature and the volume flow rates of hot water consumption. These can be specified at different time resolutions and following different methods, from fixed schedules to stochastically varying profiles. It has been argued that more realistic load profiles could be obtained with stochastic methods. Fischer et al. (Fischer et al., 2016) proposed a stochastic bottom-up model in which the number, times and durations of tappings are sampled from probability distributions for each activity requiring hot water.

In order to account for the high variability of hot water heating loads, stochastic profiles are generated following a method roughly similar to that proposed in the previously cited article, but with simplifications so as to use a minimum number of parameters. In particular, distinctions in activity types and in day type are not made. The number of

tapping starts for each day is modelled as a Poisson distribution. Hot water temperature is assumed to be constant at 50 °C. The flow rate during each tapping is assumed to follow a normal distribution.

Calibration method

Since uncertainties cannot be ruled out from the system and even less from the hot water demand, it seems promising to use a Bayesian approach to calibration. A Bayesian approach inspired the reference work of Kennedy and O’Hagan (Kennedy & O’Hagan, 2001) is implemented. Uniform prior distributions are chosen for all the parameters summarized in Table 1. The calibration model is implemented in Python using PyMC3 (Salvatier et al., 2016). The state-of-the-art No-U-Turn Sampler (NUTS) is used to sample from the posterior distribution.

Calibration experiment

A calibration experiment is carried out with synthetic data in order to investigate the research question. The calibration parameters summarized in Table 1 are assumed to vary in the specified ranges. Latin hypercube sampling (McKay et al., 1979) is used to sample the corresponding parameter space effectively, for a number $n_{sim} = 200$ of simulations.

Table 1: Calibration parameters

PARAMETER	MIN	MAX	UNIT
Tank volume	0.15	0.25	m ³
Tank height	1.0	2.0	m
Temperature of tank room	10	20	°C
Length of pipe to tank	0.5	4.5	m
Recirculation rate as a percentage of nominal flow rate	1.0	3.0	%
Mean number of taps per person day	2.0	4.0	
Mean volume flow rate of taps	0.01	0.02	l/s
Mean daily profile shift	-2.0	2.0	h

The simulation parameters summarized in Table 2 are assumed for all simulations.

Table 2: Simulation parameters

PARAMETER	VALUE
Simulation period	28 days
Output time step	10 minutes
Primary supply temperature	70 °C
Hot water demand temperature	55 °C

Result aggregation

The main result variable considered here is the heat power delivered to the system, as it would be measured by a district heating provider.

The raw results would be the time series formed by this variable at the output time steps $(\dot{q}_i)_{1 \leq i \leq n}$, which can be seen as a long vector (of length $n = 4032$ for 28 days simulation at a 10-minute time step). These results can be aggregated into shorter vectors or in scalar indicators. A simple example of indicator is the total supplied energy $Q = \frac{1}{1000} \sum_1^n \dot{q}_i \Delta t$ in kWh with Δt the output time step duration in h. Table 3 summarizes the aggregated values investigated in this paper.

Table 3: Processed outputs

NAME	SYMBOL	UNIT	LENGTH
Supplied energy	Q	kWh	1
Number of starts	n_{st}	1	1
Autocorrelation of supplied power	$R_{\dot{q}\dot{q}}(\tau)$	1	6
Time-of-day hourly averages of supplied power	$\dot{q}_{day,h}$	W	24

Autocorrelation at a given time lag τ provides a representation of the dynamics and of the typical duration of supply events. Time lags from one to 6 time steps are considered, as autocorrelation becomes almost null at time lags over one hour. The calibration experiments are repeated with different sets of processed outputs summarized in Table 4.

Table 4: Sets of processed outputs

NAME	A	B	C
Supplied energy	✓	✓	✓
Number of starts		✓	✓
Autocorrelation of supplied power		✓	✓
Time-of-day hourly averages of supplied power			✓

Surrogate models

The number of model evaluations necessary for sampling from the posterior makes it necessary to resort to surrogate models emulating the results of building simulation at much lower computational costs. Based on the n_{sim} simulations, fast surrogate models are trained to approximate processed outputs of the simulations.

Gaussian processes are used as surrogate models, taking advantage of their ability to learn nonlinear relations with high accuracy and to give an estimate of uncertainty at each point (Lim & Zhai, 2017; Rasmussen, 2003). The implementation of Gaussian processes in the scikit-learn library (Pedregosa et al., 2011) is used. One surrogate model is trained for each dimension of each one of the processed outputs described in the previous section. Feature selection is carried out before training the surrogate models, using univariate linear regression tests to keep only significant calibration parameters for each surrogate model.

RESULTS AND DISCUSSION

Simulation results

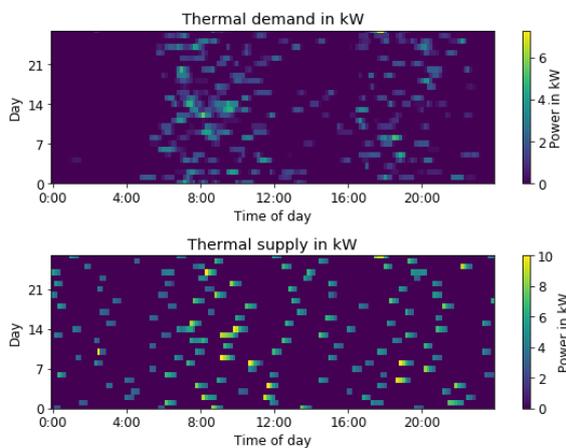


Figure 2: Day/time raster plots of demand and supply in a typical simulation run

Simulation results for a typical run are illustrated in Figure 2. These figures reveal the stochastic aspect of the results, with short spikes of heat supply occurring concentrated near times of higher hot water demand in the morning and evening, but rather randomly. Among the remarkable differences between thermal powers on the demand and supply side, one may note regular supply starts during the night and early afternoon at times of no or low demand, which may be ascribed to thermal losses in the storage.

Calibration results

Figure 3 shows a juxtaposition of the prior and posterior distributions of the calibration parameters, together with their true values for case. Starting from a uniform prior distribution, some calibration parameters keep a flat posterior distribution, meaning that these parameters cannot be calibrated based on the available data. For other parameters, such as tank volume, a much sharper posterior distribution can be obtained.

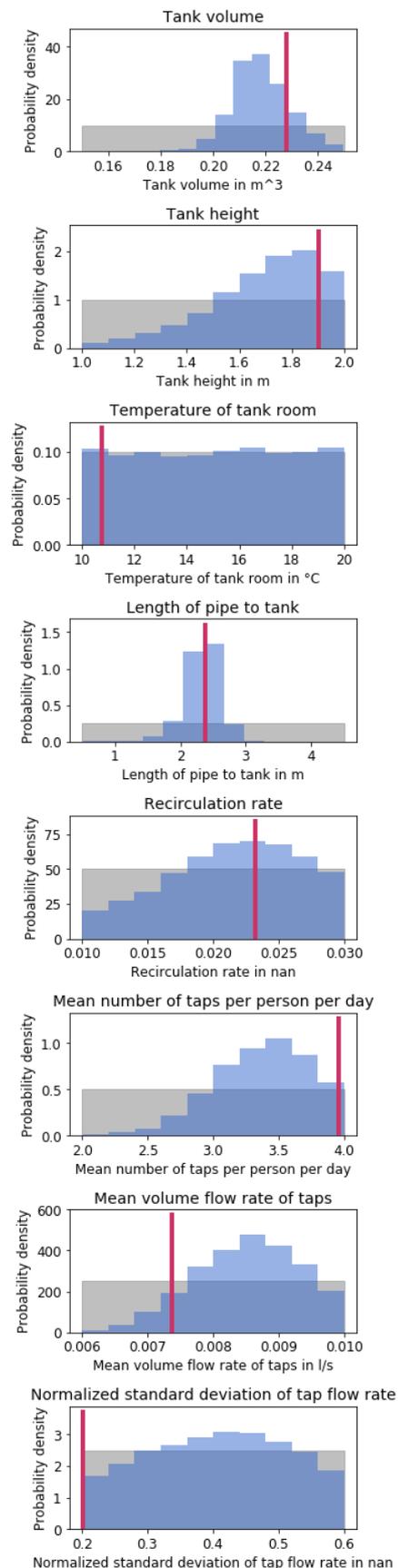


Figure 3: Prior distribution in grey, posterior distribution in blue, true value in red

The expected mean squared error from the true value of each parameter is used to quantify the distance from the prior and posterior distributions to the true value. The results summarized in Table 5 show the reduction in uncertainty made possible with the addition of additional output indicators from A to C. However, this only applies to some parameters, while for others the mean squared error from the true value remains almost constant, meaning that they remain “uncalibrated”.

Table 5: Average mean squared distance from true value of normalized input parameters in prior and posterior distributions

PARAMETER	PRIOR	POSTERIOR		
		A	B	C
Tank volume	0.40	0.38	0.15	0.15
Tank height	0.49	0.41	0.32	0.30
Temperature of tank room	0.52	0.51	0.52	0.52
Length of pipe to tank	0.29	0.29	0.28	0.08
Recirculation rate	0.33	0.33	0.26	0.26
Mean number of taps per person per day	0.56	0.32	0.33	0.35
Mean volume flow rate of taps	0.33	0.41	0.37	0.35
Normalized standard deviation of tap flow rate	0.57	0.58	0.57	0.58
Mean daily profile shift	0.37	0.37	0.36	0.31

These results are confirmed when repeating the experiment with different choices of the ground truth, as illustrated in Figure 4. In these scatter plots, points on the diagonal mean that the distance from the truth remains equal for posterior and prior, meaning that calibration does not happen for the corresponding parameter. On the other hand, points below the diagonal point to an improvement in the parameter estimate and thus to successful calibration. For a parameter with limited impact like the temperature of the tank room, calibration fails in all the experiments. For the tank volume, calibration seems to succeed in cases B and C. For the mean daily profile shift, calibration fails in cases A and B, but succeeds with the additional output indicators in C.

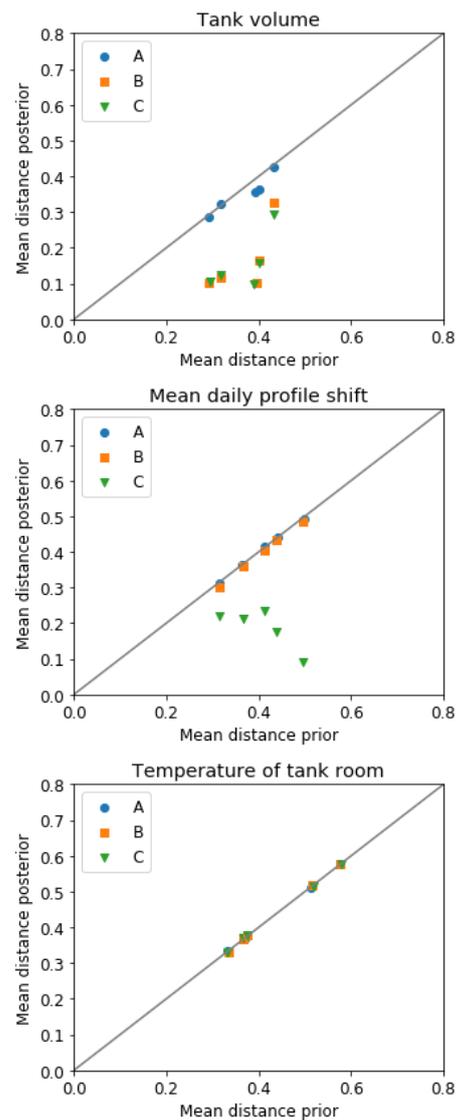


Figure 4: Mean distance from true value in prior versus posterior distributions for different “truths” and different sets of output indicators A, B and C

Discussion

Calibration and stochastic behavior models are two relevant components in the application of building performance simulation to support decisions in energy systems. Combining these two components raises the question addressed in this paper: if outputs at a given time step are stochastic, how can simulation and measurements be compared? We argue that simulation outputs should be processed adequately for such calibration, and carry out a calibration experiment with synthetic data to prove the approach.

The results show that processed outputs resulting from different ways of aggregating the raw simulation results make it possible to reduce the uncertainties in different input parameters. Different

input parameters affect simulation results differently, and thus have different impacts on different output indicators. For instance, parameters such as the profile shift have an influence on the temporal distribution of heating loads but not on their sum. Consequently, calibrating such parameters cannot be done using only the latter value, but becomes possible with output indicators reflecting temporal distribution, such as time-of-day hourly averages.

When selecting processed outputs for calibration, one should take into account their predictability, but also their “informativeness” for input parameters of interest. The predictability of processed outputs depends on the stochastic models involved and on the level of aggregation.

The exclusive use of synthetic data is arguably a limitation of the present study, as it neglects many of the complexities of real calibration problems. However, it is this use of synthetic data that makes it possible to investigate the ability of a calibration method to get closer to a ground truth otherwise not accessible. Therefore, further investigations with synthetic data may yield additional insight. For instance, the impact of the duration of a calibration period (here four weeks) on the quality of results would be of interest. It may be expected that longer calibration periods should lead to higher predictability for some aggregated results and thus more accurate calibration.

The possibly high number of uncertain parameters in typical occupant models is an issue which may deserve attention and has been avoided in the present paper by choosing a simple model with a limited number of parameters. The issue may be addressed with sensitivity analysis.

Several practical applications of the Bayesian calibration methodology may be considered, including fault detection and diagnosis, as well as improved controls. Probabilistic fault detection and diagnosis may be carried out with the present method by introducing uncertain parameters corresponding to faulty behaviour. For instance, an excessive recirculation rate may be diagnosed with the model described here. Calibrated simulation with stochastic profiles may also be used for the improvement of system controls. In this context, the consideration of uncertainties may be expected to result in more robust choices, as observed in published work on stochastic model predictive control.

CONCLUSION

This paper investigated calibration in the context of simulation models including physical components and stochastic behavioral models for domestic hot water consumption. In this context, simulation outputs and measurements should be aggregated in order to make comparison and calibration possible.

The paper shows that, aggregating simulation results in various ways, parameters used in stochastic behaviour models can be calibrated in a Bayesian setting. A proof-of-concept of the approach is presented with synthetic data, using simulation with known input parameters as a ground truth. The degree of uncertainty reduction strongly depends on the parameters and on the output indicators used. For some parameters, calibration is impossible when looking only at aggregate energy consumption but becomes possible when looking at other output indicators. There is potential in investigating further output indicators and their combinations, considering the tradeoff between computation effort and quality of calibration results.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was performed within the TEMPO project, funded by the European Union’s Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 768936.

REFERENCES

- ASHRAE. (2002). *ASHRAE Guideline 14 – Measurement of Energy and Demand Savings* (ASHRAE Guideline 14). ASHRAE.
- Chong, A., Lam, K. P., Pozzi, M., & Yang, J. (2017). Bayesian calibration of building energy models with large datasets. *Energy and Buildings*, 154, 343–355. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.069>
- Coakley, D., Raftery, P., & Keane, M. (2014). A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and sustainable energy reviews*, 37, 123–141.
- Fischer, D., Wolf, T., Scherer, J., & Wille-Haussmann, B. (2016). A stochastic bottom-up model for space heating and domestic hot water load profiles for German households. *Energy and Buildings*, 124, 120–128.
- Gaetani, I., Hoes, P.-J., & Hensen, J. L. M. (2016). Occupant behavior in building energy simulation: Towards a fit-for-purpose modeling strategy. *Energy and Buildings*, 121, 188–204. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.038>
- Heo, Y., Choudhary, R., & Augenbroe, G. A. (2012). Calibration of building energy models for retrofit analysis under uncertainty. *Energy and Buildings*, 47, 550–560. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.029>
- Kennedy, M. C., & O’Hagan, A. (2001). Bayesian calibration of computer models. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 63(3), 425–464.

- Lim, H., & Zhai, Z. J. (2017). Comprehensive evaluation of the influence of meta-models on Bayesian calibration. *Energy and Buildings*, 155, 66–75.
- McKay, M. D., Beckman, R. J., & Conover, W. J. (1979). Comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*, 21(2), 239–245.
- Modelica DisHeatLib library.* (2019). <https://github.com/AIT-IES/DisHeatLib>
- Modelica IBPSA library.* (2020). <https://github.com/ibpsa/modelica-ibpsa>
- Ouf, M., O'Brien, W., & Gunay, B. (2020). Optimization of electricity use in office buildings under occupant uncertainty. *Journal of Building Performance Simulation*, 13.
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., & Duchesnay, E. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825–2830.
- Rasmussen, C. E. (2003). Gaussian processes in machine learning. *Summer School on Machine Learning*, 63–71.
- Remmen, P., Schäfer, J., & Müller, D. (2019). Refinement of Dynamic Non-Residential Building Archetypes Using Measurement Data and Bayesian Calibration. *Proceedings of the 16th IBPSA internal conference. Building Simulation 2019*.
- Salvatier, J., Wiecki, T. V., & Fonnesbeck, C. (2016). Probabilistic programming in Python using PyMC3. *PeerJ Computer Science*, 2, e55.
- Sun, J., & Reddy, T. A. (2006). Calibration of building energy simulation programs using the analytic optimization approach (RP-1051). *HVAC&R Research*, 12(1), 177–196.
- Tahmasebi, F. (2016). *Exploring the effectiveness of occupant behavior models toward more reliable building performance simulation* [PhD Thesis]. Technische Universität Wien.
- Wetter, M., & USDOE. (2019). *BuildingsPy*. <https://doi.org/10.11578/dc.20190430.2>
- Yan, D., O'Brien, W., Hong, T., Feng, X., Gunay, H. B., Tahmasebi, F., & Mahdavi, A. (2015). Occupant behavior modeling for building performance simulation: Current state and future challenges. *Energy and Buildings*, 107, 264–278. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.08.032>
- Yao, J. (2020). Uncertainty of building energy performance at spatio-temporal scales: A comparison of aggregated and disaggregated behavior models of solar shade control. *Energy*, 195, 117079. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117079>

ENERGY DEMAND PREDICTION FOR RESIDENTIAL BUILDINGS AT DIFFERENT CLIMATE CONDITIONS BASED ON DIFFERENT DATA-DRIVEN MODELS

O. K. İşeri¹, S. Akin¹ and I. G. Dino¹

¹Department of Architecture, Middle East Technical University, Turkey, Ankara

ABSTRACT

The prediction of energy demand provides insights to improve energy performance and to reduce the environmental impact of buildings. In this paper, a data-driven prediction model for the energy demand of small-scale building stock at two different cities in Turkey, by using various prediction methods, i.e., Multiple Linear Regression (MLR), Random Forest (RF), Multilayer Neural Networks (NNN), and Multiple-Output Multilayer Neural Networks is presented. These data-driven models are suitable to hasten the simulation process of Urban Building Energy Modeling (UBEM), where the model complexity is high and requires long-term planning, especially for residential buildings. The energy demand results are presented based on RMSE, MAE, r^2 , particularly for heating, cooling, and lighting demands of the city models.

INTRODUCTION

The existing building stock represents 40% of the total energy demand by including zone heating, cooling, lighting, domestic hot water, and equipment energy consumptions (EEA, 2008). On the other hand, as the effects of climate change are beginning to make an impact on our lives gradually, the urbanization process should consider organizing sustainable energy and resource use (Stocker et al., 2013). The preparation for the retrofit transformation starts with the estimation of the future conditions. Urban Building Energy Modeling (UBEM) is a useful method to track and examine the existing or new building stock at urban level. UBEM helps to monitor climate and energy demand patterns regarding the adaptation of different refurbishment scenarios in terms of energy efficiency (Hong et al., 2020; Kontokosta et al., 2018). Various studies focused on the energy demand, indoor occupant thermal comfort prediction in buildings for energy-efficiency design transformation (EIE, 2010; McKenna et al., 2013; Suganthi & Samuel, 2012).

The formation of the estimation process for UBEM can be realized with the adaptation of top-down (i.e., data-driven) or bottom-up models. The bottom-up models are generally applied to simulations methods with zone-based thermal models (Kavgic et al., 2010; Reinhart et al., 2013), and the top-down models are

used for comprehending the overall energy demand and comfort trends of existing building stocks (Gassar et al., 2019; Howard et al., 2012). According to data availability, the top-down models are much faster than the bottom-up models and also propose a more straightforward solution to analyze larger building stock archetype datasets.

There are different top-down models used by researchers to predict the energy demands of building stock in the framework of UBEM (Kontokosta et al., 2018). Based on this purpose, several specialized algorithms are developed which can forecast the energy demand changes over time or estimate the retrofit scenarios for future conditions (Moghadam et al., 2019; Papadopoulos et al., 2018; Vásquez et al., 2016). For instance, the linear regression models are suitable for understanding the energy demand pattern of building stock. However, they are not efficient enough to provide a solution for the non-linear complex models (Sjögren et al., 2007; Tabasi et al., 2016). Lately, neural network models have become popular, and, these models are potent to estimate the energy demand of building stock by dealing with larger data sizes and complex models (Gajowniczek et al., 2017; Kankal et al., 2011).

The building stock for the developing countries is expected to have drastic changes in the future, e.g., in number, area, and energy demand. For climate change mitigation, understanding these countries' future energy trajectories is critical to identify future environmental challenges. As a developing country, Turkey, and its building stock have been started to be studied, since city planning and energy issues have gained importance in recent years. Several studies were conducted to forecast the electricity and gas demand of Turkey's building stock with the neural network algorithms (Hamzaçebi, 2007; Kaynar et al., 2011).

The main challenge for the top-down models is the lack of available the recorded energy usage data or the organized the building stock datasets based on construction properties, energy demand profiles, and the number of occupants (Chen et al., 2018; Duranton & Puga, 2014; Pauliuk et al., 2013). Related, various researchers have studied the classification of building

data (Davila et al., 2016; Filogamo et al., 2014; Tardioli et al., 2018), and the several city management shared the building specifications dataset for the the urban analytics that could lead the formation of the UBEM (IIO, 2020; Nyc.gov, 2020; Paris, 2018).

This paper aims to apply the different data-driven models for two different neighborhood regions and to estimate different energy demands for Kültür Mahallesi, Izmir, and Bahçelievler, Ankara located in Turkey. The simulation-based generated energy demand data are used for the training of the top-down models. The main aim of this paper to compare four different top-down model performance based-on the error prediction rate.

METHODOLOGY

In this chapter, the methodology of the four different data-driven models were presented in terms of the how the energy demand data was generated, the specifics of the data, the different types of the prediction algorithms.

The Generated Energy Demand Data (kWh/m²)

The selected zones are one of the most densely populated neighborhoods in Turkey, namely Kültür in Izmir, and Bahçelievler in Ankara (Figure). Izmir is in ASHRAE climate zone 3A ($2500 < CDD_{10^{\circ}C}$ (Cooling Degree Days) < 3500), therefore, the cooling energy demand is an essential objective for the region. Ankara is in 4B ($CDD_{10^{\circ}C} \leq 250$, $HDD_{18^{\circ}C}$ (Heating Degree Days) ≤ 3000) (Ashrae, 2009), and the heating energy demand has the most significant share for the total energy demand. The building typology of the two regions consists of mostly residential buildings with retail units on the ground floors. In the Izmir case, there are five-six storey 525 buildings in total 459.567 m², Ankara case, there are three-four storey 560 buildings in total 574.353 m².



Figure 1: Kültür, Izmir (left); Bahçelievler, Ankara (right)

The publicly sharing option of the city datasets of Turkey is under the protection by the law (KVKK, 2018). Therefore, the training data was generated by employing the bottom-up building energy simulation method. There is no available energy demand data for the selected regions in Turkey (TÜİK, 2010). Therefore, the dataset was generated. There are different data sources were used about 3d and thermal modeling, e.g., geographical information data (.gis)

for building layouts and number of flats; google images for building height, window to wall ratio; and statistical information for construction date, occupant density, and profiles. The .gis data was taken from the local municipality, and buildings' height information was retrieved from the google images. Other essential information was derived from the Turkish Statistical Government Bureau (TÜİK, 2010) based on city researches, e.g., occupant type and density, conditioning type.

The building stock for each neighborhood is modeled based on TS-825 and Ashrae standards (ASHRAE, 2013; TSE, 2008). All of the building energy simulations were executed with EnergyPlus simulation software which works with python (Crawley et al., 2000). All simulations were executed separately for each flat unit, and peripheral buildings were introduced as context geometries to the simulations, thus, the computing cost of the simulations decreased.

The building energy simulations require two essential inputs as geometrical and climate data. The climate data for each region were selected from the years between 2003-2017, which are generated based on typical meteorological year (TMY) methodology (Jiang, 2010). TMY is useful for representing the general climate trends of the region, preventing the extreme conditions.

The Characteristics of the Data

For Izmir, the data covers the heating, cooling, and lighting energy demands, but for Ankara, only heating and lighting energy demands were included as objective (Y). For Izmir, the features of *the number of people per sqm* for each zone was defined in accordance with the function of the zone, e.g., living room or bedroom, and only residential building typology exists. On the other hand, *the number of people per sqm* is constant for the whole zone, and there are two different building typologies as residential and retail for Ankara. Therefore, the two datasets separate from each other.

The heating and cooling demand ratios were defined according to (TÜİK, 2010), and because of the zone cooling system ratio was highly low for the case Ankara, the zone with cooling systems were ignored for the Ankara. The zone partitioning is made in the unit plan as living, service, and bedroom zones, and the cooling system was applied as an option for living and bedroom. On the other hand, units with only heating space conditioning systems were determined as a single zone. The objectives and variables for training data of the city models can be seen, both for Izmir and Ankara, in Table 1.

Table 1:
Example of a table features of the generated data,
train/test/validation, Izmir/Ankara

Feature	Data	Type
Heating, kWh/m ²	Continuous	Y ₁
Lighting, kWh/m ²	Continuous	Y ₂
Cooling*, kWh/m ²	Continuous	Y ₃
Building Function**	Discrete,2	X ₂₇
Floor Area, sqm	Continuous	X ₁
Floor Number	Discrete,6	X ₂
Number of people per sqm** (constant)	Continuous	X ₂₃
Num. of pe. per sqm service*	Continuous	X ₂₄
Num. of pe. per sqm living*	Continuous	X ₂₅
Num.. of pe. per sqm bedroom*	Continuous	X ₂₆
Construction Type	Discrete,2	X ₃
Occupancy Schedule	Discrete,3	X ₄
Window Count	Discrete ,4	X ₅
Window Area, sqm	Continuous	X ₆
Window Orientation	Discrete,2	X ₇ -X ₁₄
Context Opening	Discrete,2	X ₁₅ -X ₂₂

*only for Izmir, ** only for Ankara

The cooling conditioning system ratio is just only 20% for the region of Izmir (TÜİK, 2010), and therefore, the total number of data for cooling represents 20% and heating is 80% of total data. For Ankara, all the building units have a heating system, and the total number of data is higher than Izmir. On the other hand, the objective and zone types are more than one for the case of Izmir. The data shape of the Ankara dataset is 5928,20; and it is 2023,25 for the Izmir dataset.

Regression for Building Energy Demand

The data-driven models are practical tools for energy simulation models in terms of computing cost and alternative interpretation for different cases. Regression models can form the functions for inter-relation between independent variables to estimate the dependent variables, which is building energy demand in this study (Fumo & Rafe Biswas, 2015). According to the number of model variables, the complexity could increase, which means that the inclusion of different algorithms to train the data and to validate the outputs becomes hard to manage.

Multiple Linear Regression

The multiple linear regression (MLR) aim to form the relationship of the variables by fitting a linear mathematical equation to the data. If there is more than one predictor variable (X_1, \dots, X_n), and these variables are related to predicting the response (Y) value, the MLR (Freedman, 2009) is suitable for the task.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \mathcal{E} \quad (1)$$

In the given equation (1), Y is the dependent variable, X_1, X_2, \dots, X_n are the predictor variables, $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ are the regression coefficients, and \mathcal{E} is the error term of the model.

Various studies were adapted MLR to predict the energy demand of residential stock by using physical and operational parameters of buildings (Fumo & Rafe Biswas, 2015; Gassar et al., 2019).

Random Forest

Random Forest (RF) is a supervised machine learning algorithm for the classification or regression purposes that contains a large number of decision trees. Statistically, the algorithm aims to decrease the variance and bias of the model. A decision tree is composed of a recursive loop to split the non-overlapping predictions randomly. The predictions are the result of the sum of all trees' mean value.

There are different examples of RF in the field of building energy modeling to predict the energy demand of buildings or to classify the prominent features for energy demand (Ahmad et al., 2017; Kontokosta & Tull, 2017).

Neural Network for Regression

Neural Networks (NN) are the imitated representation of the human learning process by using the input data to regress or classify output variables. NN is composed of multiple layers, i.e., input, hidden, output layer. Each layer consists of different nodes that transmit the information with weighted connections and transfer functions. According to the layer and node number, the complexity or learning capacity of the model could increase or decrease. Based on the output activation function, the model can be used for regression or classification. In this study, multi-layer perceptron neural networks with single-output (NN_S) and multiple-output (NN_M) examples are used.

NN can predict the energy demand of building stocks because of their capacity to handle complex datasets (Howard et al., 2012; Kaynar et al., 2011). For building energy models, the predictors can vary from the physical to operational characteristics of the data, e.g., window area, window direction, occupant density. In this study, two different cases contain a different number of data sizes and features to compare the performance for the urban building energy demand's estimation process, e.g., non-binary and all parameters.

NN models could come across the over-fitting problem if the precision of the algorithm reaches 100%, the state of learning could transform to unintended memorization, which decreases the predictive performance of the algorithm for new data. The problem could be overcome with hyperparameter tuning (Østergård et al., 2018). MLR and RF algorithms have lower learning capacity rather than the NN models. The data size is also directly related to the tuning process and learning performance. Therefore, the performance of the algorithm could be increased by controlling the batch size, training-test split ratio, and the number of predictors. Hyper-

parameter tuning could lead to balance the loss function value to generalize the algorithm performance in NN models, e.g., regularization or dropout, regulating learning rate or neuron number, starting weight with randomization. The selection of relevant hyperparameter values could lead to acceptable learning ratios for the algorithm—this study exemplifies the process of tuning in the aspect of the NN_M and NN_S model training process.

The difference between NN_S and NN_M models relies on the number of output variables that they estimate. In some cases, multiple outputs could be advantageous for the learning process because multiple output variables work as an extra feature in the learning data. For this study, three types of energy demand were predicted for the selected region of Izmir in terms of cooling, heating, and lighting. The same procedure for Ankara was followed for the heating and lighting output variables. NN_M and NN_S results are presented with spatial distribution on the observation regions and comparative plots (Fonseca & Schlueter, 2015).

The Evaluation of Performance

The prediction of the output variables that are based on the self and inter-correlation of independent variables makes possible the process of regression on pre-defined metrics. For this study, Mean Squared Error (MSE) is used as evaluation metrics for training and validation loss calculation. It is the average of the squared difference between the target value and the value predicted, and it punishes the small errors that could cause over-estimation (2).

$$MSE = \frac{1}{N} \sum (y - y_{pred})^2 \tag{2}$$

Three different metrics are used in the study to compare the performance of algorithms between training and test data, e.g., Root-Mean-Squared-Error (RMSE) (3), and Coefficient of Determination (r²) (4) and Mean Absolute Error (MAE) (5).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y - y_{pred})^2}{N}} \tag{3}$$

$$r^2 = 1 - \frac{y_{pred}}{y} \tag{4}$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum |y - y_{pred}| \tag{5}$$

RESULTS

The Statistics of the Data

The training data were generated with EnergyPlus building energy simulation software using statistical indicators for thermal characteristics of the model and .gis information for the building stock geometries. Table 2 points out the statistical evaluation of the generated data.

Table 2:
Statistical representations of objectives, Izmir/Ankara

Izmir (kWh/sqm) - Count:2023						
Feature	Mean	Min	Max	Std.	Skew	Kurt
Heating	34.65	11.08	117.38	12.04	1.55	4.81
Lighting	8.01	5.72	13.18	1.73	1.00	0.35
Cooling	32.00	7.14	94.70	13.88	0.80	0.34
Ankara (kWh/sqm) - Count:5928						
Feature	Mean	Min	Max	Std.	Skew	Kurt
Heating	69.99	20.09	152.33	21.72	0.42	-0.43
Lighting	16.74	15.26	19.67	0.96	0.50	-0.77

The heating demand of Izmir values was found lower than Ankara because of the fewer heating degree days; however, the data distribution was found more homogenous for the case of Ankara according to the kurtosis value. In addition, lower heating demand values are dense because there is a positively skewed formation for both curves. For the lighting demand, the values are higher for Ankara due to less amount of solar radiation (W/m²). The cooling values of Izmir are similar to the heating values except for the kurtosis value, which is 0.34. It states that the data distribution curve depth is lower than the normal distribution curve.

The Results for Multi-Linear Regression

Table 3 points out the MLR algorithm performance results. During the training process, different test-ratio values were tested; therefore, the most successful results were added in the table based on comparison metrics. In the first case, which is the binary feature extracted data, the window orientation (X₇ – X₁₄) and context opening parameters (X₁₅ – X₂₂) were taken out from the set to observe the performance of the algorithm only with continuous and non-binary variables. The other set of training was executed with all parameters. As a result, the performance of the values was found higher than the non-binary continuous and categorical variables as it is expected.

Table 3:
The results for Multi-Linear Regression

Y	Parameter	r ²	MAE	RMSE	Test Set	Loc.
Cooling	*Non-binary	0.564	0.106	0.131	10%	Izm
Heating		0.407	0.078	0.104		
Lighting		0.376	0.169	0.220	20%	
Cooling	All, 25	0.715	0.088	0.111	10%	Izm
Heating		0.657	0.066	0.087		
Lighting		0.471	0.163	0.209		
Heating	*Non-binary	0.826	0.073	0.093	10%	Ank
Lighting		0.779	0.103	0.137		
Heating	All, 20	0.969	0.031	0.040	20%	
Lighting		0.811	0.099	0.128		

* X₁, X₂, X₂₄, X₂₅, X₂₆, X₆

r² values state that the learning capacity of the MLR model increases when the size of the dataset increases. On the other hand, the case of Izmir consists of more data features, but it seems that these extra features did

not develop any rise for the performance of the model. As a result, the performance metrics of Ankara was found more accurate than the case of Izmir for heating and lighting output variables.

The Results for Random Forest

Table 4 shows the performance of the Random Forest (RF) algorithm with a similar comparison strategy to MLR. For each output variable, the performance of the model increases when the number of the feature increases, except the training process of lighting energy demand in Ankara. RF algorithm is capable of predicting energy demand values if the size of the data is at an acceptable level compared to the region of Ankara. The difference between the target and the predictor variables are highly close to zero for the heating and lighting demands of Ankara. On the other hand, for the smaller size datasets, the ratio for the test data could be increased to obtain similarly distributed test and training set.

Table 4: The results for Random Forest

Y	Parameter	r ²	MAE	RMSE	Test Set	Loc.
Cooling	Non-binary	0.557	0.105	0.131	20%	Izm
Heating		0.560	0.064	0.092	20%	
Lighting		0.314	0.180	0.226	20%	
Cooling	All, 25	0.699	0.095	0.118	10%	
Heating		0.763	0.052	0.073	20%	
Lighting		0.451	0.167	0.210	20%	
Heating	Non-binary	0.975	0.029	0.037	10%	Ank
Lighting		0.977	0.028	0.035		
Heating	All, 20	0.977	0.027	0.036		
Lighting		0.809	0.096	0.128		

The Results for Neural Network

The architecture of NN was composed differently for Izmir and Ankara cases. Ankara case is trained with four hidden and one dropout layer, and three layers and one dropout for Izmir. As activation function rectified linear unit (relu) was selected. The hyperparameter tuning was executed for better training performance as managing the number of hidden layers and neurons, training batch size, training time, and learning rate.

Table 5: The results for single-output Neural Network

Y	Parameter	r ²	MAE	RMS E	Test Set	Loc.
Cooling	Non-binary	0.424	0.095	0.124	10%	Izm
Heating		0.343	0.064	0.097		
Lighting		0.203	0.181	0.209		
Cooling	All, 25	0.700	0.071	0.092		
Heating		0.761	0.042	0.058		
Lighting		0.639	0.107	0.145		
Heating	Non-binary	0.770	0.062	0.080	10%	Ank
Lighting		0.788	0.100	0.134		
Heating	All, 20	0.978	0.017	0.024		
Lighting		0.852	0.091	0.117		

Table 5 points out that NNs is performed successfully for Ankara with all parameters, even it could not pass the performance of RF for other comparison cases. Similarly, the results of Izmir with non-binary parameters were found lower than the Ankara case. Consequently, the number of instances was found more effective than the number of attributes as the results of the Izmir case were less accurate.

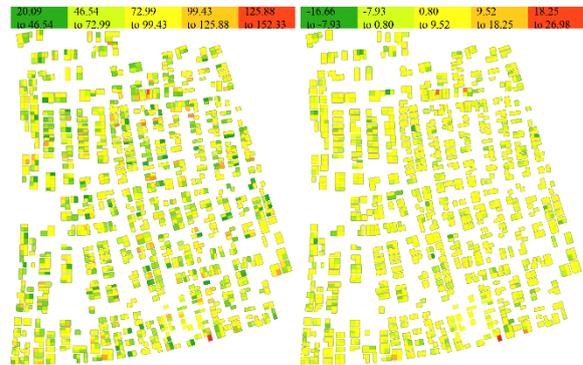


Figure 2: Ankara heating demand (left); predicted demand error spatial distribution (right), kWh/sqm

Figure 2 presents the spatial distribution of the simulation-based generated heating demand and data-driven based generated heating demand prediction error for the region of Ankara. For the map at the left, the heating energy demand changes averagely between 72.99 to 99.43 kWh/sqm. The error values are distributed close to between 0.80 and 9.52 kWh/sqm for Ankara.



Figure 3: Izmir cooling demand (left); predicted demand error spatial distribution (right), kWh/sqm

Figure 3 is the spatial distribution of the simulation-based generated cooling demand and data-driven based generated cooling demand prediction error for the region of Izmir. The cooling energy demand averagely varies between 24.66 and 42.16 kWh/sqm, which is lower than the median value. The error gap is close to the yellow bar that is bounded between -3.90 to 8.42 kWh/sqm for Kültür, Izmir

Table 6:
The results for multiple-output Neural Network

Y	Parameter	r ²	MAE	RMS E	Test Set	Loc.
Cooling	Non-binary	0.531	0.093	0.117	10%	Izm
Heating		0.376	0.067	0.092		
Lighting		0.111	0.162	0.211		
Cooling	All, 25	0.756	0.065	0.084		
Heating		0.692	0.059	0.075		
Lighting		0.454	0.096	0.139		
Heating	Non-binary	0.936	0.030	0.040	10%	Ank
Lighting		0.635	0.098	0.133		
Heating	All, 20	0.976	0.020	0.027		
Lighting		0.690	0.085	0.117		

Table 6 shows the results of Izmir and Ankara for non-binary and all parameters' cases with NN_M. The training performances were found higher for Ankara. The non-binary case in Ankara performed better than the all parameters case in Izmir. Therefore, the results differed more when the data size of the number of instances increased for NN_M. The difficulty of the prediction was more for Izmir as the output variable composes of three output variables. Therefore, the architecture of NN was found different for two regions (Figure 4, top-right). The simpler architecture was proposed for the cases of Izmir. However, the hyperparameter tuning was found longer for Izmir, and the model demanded more time to converge. For both of the regions, the estimation of lighting value error was higher than the other energy demand types, according to Figure 4.

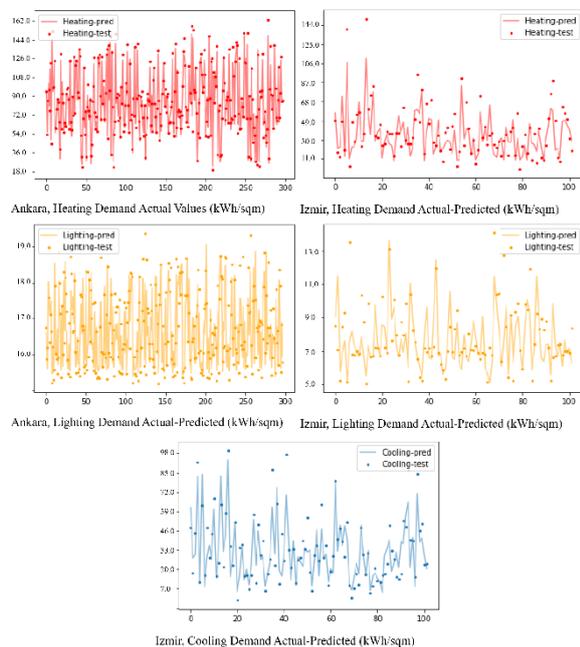


Figure 4: *Visualization of target and predicted difference for multiple-output Neural Network*

Based on the dataset and the problem, different data-driven problems could be faced, e.g., under-fitting and over-fitting problems. As a suggestion to the problem, hyperparameter tuning could be an effective solution. Lastly, the prediction performance was found more most descriptive for the cooling demand in the Izmir

case and the heating demand in Ankara for all comparative cases.

DISCUSSION

The model complexity proceeds in parallel with the learning capacity based on the accuracy of the comparison metrics of four data-driven algorithms. The RF was successful for each case based on comparison metrics, i.e., r², MSE, RMSE. However, if the size of the dataset increases in terms of the number of instances and attributes, the NN_M and NN_S algorithms could perform better. Due to the shape of the output variable for NN_M, the algorithm demands more complex architecture for the regression. However, it is still faster compared to the bottom-up simulation-based approaches in the model training process. NN_S and NN_M are capable of managing the datasets of this study. Nevertheless, RF and NN_M reached the most successful results. On the other hand, the tuning process was difficult for NN_M. For instance, the over-fitting problem for the Izmir cases and the under-fitting problem for the Ankara cases have occurred. In addition, applying the random weight initialization as tuning action was helpful for the problem; otherwise, the algorithm performance can be stuck to lower the performances.

CONCLUSION

This paper presents different data-driven models for the urban building energy demand prediction by comparing different cities' neighborhoods. The selected four data-driven models were used to predict heating, cooling, and lighting energy demand of a neighborhood in a hot-humid climate of Izmir and heating, lighting energy demand of a neighborhood in a cold-dry climate of Ankara. The building energy simulations were conducted with a simulation-based brute-force methodology to produce a training dataset. The generated building energy demand data consist of the physical and operational properties of the flats in the buildings for each district. Then, the two data are used for the data-driven models. Two different cases are tested for each region with extracting the binary parameters from the cluster of features and using all available parameters to compare the performance of algorithms in terms of different features. The RF and NN_M have performed the most accurate results in each case. The cases of Ankara were found more accurate based on the comparison metrics, the size of the dataset consist of more instances. In conclusion, the data-driven models provide opportunities for the UBEM simulations, and the authors developed a broad framework for the dataset arrangement for urban energy modeling.

REFERENCES

- Ahmad, M. W., Mourshed, M., & Rezgui, Y. (2017). Trees vs Neurons: Comparison between random forest and ANN for high-resolution prediction of building energy consumption. *Energy and Buildings*, 147, 77–89. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.038>
- ASHRAE. (2009). ASHRAE climatic design conditions 2009/2013/2017. Retrieved February 4, 2020, from <http://ashrae-meteo.info/>
- ASHRAE. (2013). *ASHRAE Standard 90.1-2013 -- Energy Standard For Buildings Except Low-rise Residential Buildings*.
- Chen, Y., Hong, T., Luo, X., & Hooper, B. (2018). Development of City Buildings Dataset for Urban Building Energy Modeling. *Energy & Buildings*. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.11.008>
- Crawley, B. D. B., Pedersen, C. O., Lawrie, L. K., & Winkelmann, F. C. (2000). EnergyPlus : Energy Simulation Program. *ASHRAE Journal*, (April), 49–56. <https://doi.org/10.1.1.122.6852>
- Davila, C. C., Reinhart, C., & Bemis, J. (2016). Modeling Boston: A workflow for the generation of complete urban building energy demand models from existing urban geospatial datasets. *Energy*, 117, 237–250. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.057>
- Durantón, G., & Puga, D. (2014). Chapter 5 - The Growth of Cities. In P. Aghion & S. N. Durlauf (Eds.), *Handbook of Economic Growth* (pp. 781–853). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53540-5.00005-7>
- EEA, E. E. A. (2008). Energy and environment report 2008. In *Energy*. <https://doi.org/10.2800/10548>
- EIE, I. E. E. (2010). *Monitoring of EU and national energy efficiency targets: ODYSSEE-MURE 2010*.
- Filogamo, L., Peri, G., Rizzo, G., & Giaccone, A. (2014). On the classification of large residential buildings stocks by sample typologies for energy planning purposes. *Applied Energy*, 135, 825–835. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.002>
- Fonseca, J. A., & Schlueter, A. (2015). Integrated model for characterization of spatiotemporal building energy consumption patterns in neighborhoods and city districts. *Applied Energy*, 142, 247–265. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.068>
- Freedman, D. A. (2009). *Statistical Models: Theory and Practice* (2nd ed.). <https://doi.org/10.1017/CBO9780511815867>
- Fumo, N., & Rafe Biswas, M. A. (2015). Regression analysis for prediction of residential energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 332–343. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.035>
- Gajowniczek, K., Nafkha, R., & Ząbkowski, T. (2017). *Electricity peak demand classification with artificial neural networks*. 307–315. <https://doi.org/10.15439/2017F168>
- Gassar, A. A. A., Yun, G. Y., & Kim, S. (2019). Data-driven approach to prediction of residential energy consumption at urban scales in London. *Energy*, 187, 115973. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115973>
- Hamzaçebi, C. (2007). Forecasting of Turkey's net electricity energy consumption on sectoral bases. *Energy Policy*, 35(3), 2009–2016. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.03.014>
- Hong, T., Chen, Y., Luo, X., Luo, N., & Lee, S. H. (2020). Ten questions on urban building energy modeling. *Building and Environment*, 168, 106508. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106508>
- Howard, B., Parshall, L., Thompson, J., Hammer, S., Dickinson, J., & Modi, V. (2012). Spatial distribution of urban building energy consumption by end use. *Energy and Buildings*, 45, 141–151. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.061>
- IIO. (2020). İstanbul İstatistik Ofisi. Retrieved May 7, 2020, from <https://istatistik.istanbul/>
- Jiang, Y. (2010). Generation of typical meteorological year for different climates of China. *Energy*, 35(5), 1946–1953. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.01.009>
- Kankal, M., Akpınar, A., Kömürçü, M. İ., & Özşahin, T. Ş. (2011). Modeling and forecasting of Turkey's energy consumption using socio-economic and demographic variables. *Applied Energy*, 88(5), 1927–1939. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.005>
- Kavgic, M., Mavrogianni, A., Mumovic, D., Summerfield, A., Stevanovic, Z., & Djurovic-petrovic, M. (2010). A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector. *Building and Environment*, 45(7), 1683–1697. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.01.021>
- Kaynar, O., Yilmaz, I., & Demirkoparan, F. (2011). Forecasting of natural gas consumption with neural network and neuro fuzzy system. *EGU 2010*, 26(2), 221–238.

- Kontokosta, C. E., Prof, A., Informatics, U., & Johnson, N. (2018). *A Dynamic Spatial-Temporal Model of Urban Carbon Emissions for Data-Driven Climate Action by Cities*.
- Kontokosta, C. E., & Tull, C. (2017). A data-driven predictive model of city-scale energy use in buildings. *Applied Energy*, *197*, 303–317. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.005>
- KVKK, K. V. K. K. (2018). *KİŞİSEL VERİLERİN KORUNMASI VE İŞLENMESİ POLİTİKASI*. Ankara.
- McKenna, R., Merkel, E., Fehrenbach, D., Mehne, S., & Fichtner, W. (2013). Energy efficiency in the German residential sector: A bottom-up building-stock-model-based analysis in the context of energy-political targets. *Building and Environment*, *62*, 77–88. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.01.002>
- Moghadam, S. T., Coccolo, S., Mutani, G., Lombardi, P., Scartezzini, J.-L., & Mauree, D. (2019). A new clustering and visualization method to evaluate urban heat energy planning scenarios. *Cities*, *88*, 19–36. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.12.007>
- Nyc.gov. (2020). NYC Analytics. Retrieved from <https://www1.nyc.gov/site/analytics/index.page>
- Østergård, T., Jensen, R. L., & Maagaard, S. E. (2018). A comparison of six metamodeling techniques applied to building performance simulations. *Applied Energy*, *211*, 89–103. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.102>
- Papadopoulos, S., Bonczak, B., & Kontokosta, C. E. (2018). Pattern recognition in building energy performance over time using energy benchmarking data. *Applied Energy*, *221*, 576–586. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.079>
- Paris, C. of. (2018). Paris Open City Data. Retrieved February 19, 2020, from <https://opendata.paris.fr/pages/home/>
- Pauliuk, S., Sjöstrand, K., & Müller, D. B. (2013). Transforming the Norwegian Dwelling Stock to Reach the 2 Degrees Celsius Climate Target. *Journal of Industrial Ecology*, *17*(4), 542–554. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00571.x>
- Reinhart, C., Dogan, T., Jakubiec, A., Rakha, T., & Sang, A. (2013). UMI - An Urban Simulation Environment For Building Energy Use, Daylighting And Walkability. *13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, August 26-28 - 476*, 476–483. Retrieved from http://web.mit.edu/SustainableDesignLab/publications/umi_introduction.pdf
- Sjögren, J. U., Andersson, S., & Olofsson, T. (2007). An approach to evaluate the energy performance of buildings based on incomplete monthly data. *Energy and Buildings*, *39*(8), 945–953. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.10.010>
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M. M. B., Allen, S. K., Boschung, J., ... Midgley, P. M. (2013). Climate change 2013 the physical science basis: Working Group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. In *IPCC* (Vol. 9781107057). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Suganthi, L., & Samuel, A. A. (2012). Energy models for demand forecasting - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(2), 1223–1240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.014>
- Tabasi, S., Aslani, A., & Forotan, H. (2016). Prediction of Energy Consumption by Using Regression Model. *Computational Research Progress in Applied Science & Engineering ©PEARL Publication CRPASE*, *02*(03), 110–115.
- Tardioli, G., Kerrigan, R., Oates, M., O'Donnell, J., & Finn, D. P. (2018). Identification of representative buildings and building groups in urban datasets using a novel pre-processing, classification, clustering and predictive modelling approach. *Building and Environment*, *140*, 90–106. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.035>
- TSE. (2008). *Ts 825: Binalarda Isı Yalıtım Kuralları* (Vol. 825).
- TÜİK. (2010). *TÜRKİYE İSTATİSTİK KURUMU Turkish Statistical Institute*.
- Vásquez, F., Løvik, A. N., Sandberg, N. H., & Müller, D. B. (2016). Dynamic type-cohort-time approach for the analysis of energy reductions strategies in the building stock. *Energy and Buildings*, *111*, 37–55. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.018>

BUILDING SIMULATIONS FOR CONTROL TUNING: ACCOUNTING FOR MODEL USEFULNESS IN CALIBRATION METRICS CHOICE

A. Bres¹, F. Amblard², and S. Hauer¹

¹AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Center for Energy, Vienna, Austria

²HES-SO Valais-Wallis, Sion, Switzerland

ABSTRACT

Calibration, defined as the adjustment of uncertain parameters to achieve a better agreement between simulation and measurements, is a key task in modeling existing systems. Different calibration metrics may be used to quantify this agreement. In the field of building performance simulation, a few metrics are established in practice but there is still little evidence on how to assess and select calibration metrics. This paper investigates the assumption that the values of an adequate calibration metric for given simulations models should correlate with the usefulness of these models. Investigations are carried out with synthetic data for an example heat-pump system serving a residential building, looking at model usefulness for the specific task of tuning control parameters.

INTRODUCTION

Building simulation calibration

Simulation models of buildings and heating, ventilation and air-conditioning (HVAC) systems are usually subject to a range of uncertainties. Calibration refers to the adjustment of uncertain parameters to achieve a better agreement between simulation results and measurements (Reddy et al., 2007a). Building simulation calibration as discussed in this paper is a special case of system identification (Ljung, 1999) with grey-box models of nonlinear systems. Wherever measurements are available, model calibration and validation are essential modelling steps contributing to ensuring model quality.

Calibration metrics for building simulation

In order to quantify how well the simulations and measurements agree, various calibration metrics are used. These metrics are usually expressed as a function m taking as input two vectors of the same length (n) corresponding to simulated (\hat{y}) and measured (y) values at some time steps (i) and returning a non-negative real number. Note that these calibration metrics are often not metrics in the strict mathematical sense, as they may fail to be symmetric and to satisfy the triangle inequality (Encyclopedia of Mathematics, 2016). A typical metric is the mean squared error defined in Equation (1).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (1)$$

The coefficient of variation of the root mean squared error defined in Equation (2) provides a normalized value which can be expressed in percent.

$$CVRMSE = \frac{\sqrt{MSE}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i} \quad (2)$$

The normalized mean bias error defined in Equation (3) is also expressed in percent, and is known to be only weakly informative because positive and negative biases at different time steps may cancel each other out (Royapoor & Roskilly, 2015).

$$NMBE = \frac{\sum_{i=1}^n \hat{y}_i - \sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n y_i} \quad (3)$$

ASHRAE Guideline 14 (ASHRAE, 2002) provides criteria for the successful calibration of simulation models, for instance requiring that $CVRMSE$ should be lower than 30% and $NMBE$ within $\pm 10\%$ when using hourly values of energy consumption. Despite the lack of substantiated justification, these criteria enjoy widespread use. However, limitations of these criteria and the underlying metrics have also been exposed in the literature:

- Quantitative criteria as defined in ASHRAE Guideline 14 lack time resolutions other than monthly or hourly (e.g. sub-hourly, as in the present paper), and variables other than energy use (e.g. temperatures).
- The problem of finding parameter values leading to $NMBE$ and $CVRMSE$ values close to 0 is mostly underdetermined (Reddy et al., 2007a). Low discrepancy values of the output do not exclude high input errors (Garrett & New, 2016).
- Mean squared error and derived metrics may not be adapted to calibrating simulations with discrete behaviour (e.g. on/off cycling) observed at short time steps. Since binary variables can only be changed at predefined time points, which do not necessarily

correspond to the true timestamps, there may be systematic shifts that lead to high errors despite a qualitatively good representation of reality.

- Using the same data to calibrate models and evaluate their goodness-of-fit – as is frequently done - can lead to overfitting and biased evaluation (Chong et al., 2017). Although this is a general issue and not related to any metric in particular, it deserves to be kept in mind when using quantitative criteria.

In the system identification literature, where calibration metrics are referred to as identification criteria, general criteria for their selection include consistency, robustness and ease of computation (Ljung, 1999). In the field of building simulation, the literature does not provide any definite answer to the question of how calibration metrics should be assessed and selected. In a rare attempt, Garrett & New (2016) determined the relevance of calibration metrics by correlating calibration metrics in building simulation outputs with errors in input parameters, resulting in rather weak correlations for all the investigated metrics. Similar questions on the suitability of metrics have been raised in other disciplines such as time series forecasting (Hyndman & Koehler, 2006; Kim & Kim, 2016), leading to the claim that widely used metrics such as mean absolute percentage error (MAPE) have disadvantages and alternatives should often be preferred.

In conclusion, results from the literature suggest that the question of choosing adequate metrics for building simulation calibration should not be overlooked.

Calibration and model usefulness

The approach taken in this paper relates the quality of a calibration metric to the usefulness of models for which this metric is minimized. If “all models are wrong but some are useful” (Box, 1979), as it has often been posited, model usefulness should indeed be the primary criterion in assessing simulation models in general, as well as in assessing calibration metrics. The drawback of this approach is that model usefulness in turn is often not sharply defined, and typically depends on the scientific purpose. Hence, we restrict our investigation to specific simulation use cases. We consider the case where simulation is used to compare different values of control parameters for a heating system and subsequently select the most appropriate values. In this case, the usefulness of a given model can be equated to the quality of decisions made based on this model. Also, since the investment costs for selecting different control parameters are the same (as opposed to, for instance, the costs for different refurbishment measures), one may use the simple decision-making assumption, that the control parameters with the lowest simulated costs are chosen.

Using synthetic ground truth data, it is thus possible to investigate the relations between model usefulness and model discrepancy according to various calibration metrics. Synthetic data are instrumental in evaluating calibration techniques, with several reported applications in the literature (Chaudhary et al., 2016; Reddy et al., 2007b).

Research question

In the context of dynamic building and HVAC simulation, is it possible to compare the relevance of different calibration metrics by correlating their respective values with the usefulness of simulation models? We investigate this question by using dynamic simulation to select control parameters for a hydronic heating system.

SIMULATION EXPERIMENT

Simulation model

A heating system composed of a water-water heat pump, a buffer tank and underfloor heating, as illustrated in Figure 1, is used as a test case for the investigations presented in this paper. This heating system serves a residential building.

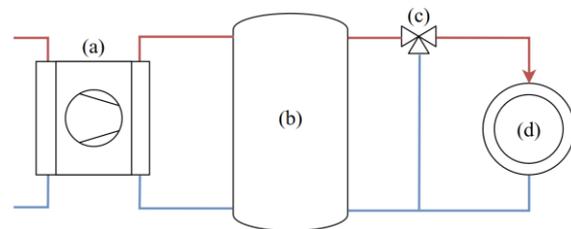


Figure 1: Conceptual system diagram. a) heat pump. b) buffer tank. c) three-way valve. d) consumer (floor heating)

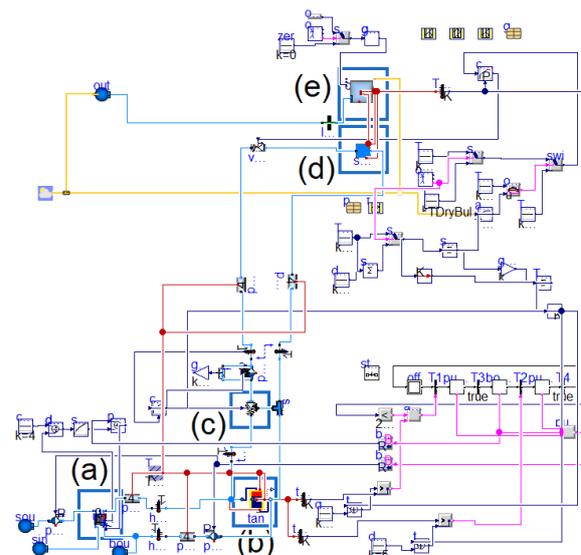


Figure 2: Simulation model diagram, including the same components as in Figure 1 as well as a single-zone building model (e) and control blocks

The system is modeled using Modelica and the Modelica Buildings library (Wetter et al., 2014) Version 6.0.0. The main components and the corresponding models from the Modelica Buildings library are illustrated in Figure 2. For the water-water heat pump, a modified version of Buildings.Fluid.HeatPumps.Carnot_y accounting for temperature dependency of heating capacity is used.

The heating curve of Equation (4) is used to determine the set point T_{sup}^{set} for the supply temperature T_{sup} to the building after a three-way valve, based on a room temperature set point T_r^{set} and a time-averaged outdoor temperature $T_{out,avg}$. The slope S and the level L of the heating curve are examples of parameters to be tuned from the perspective of an installer.

$$T_{sup}^{set} = T_r^{set} + S (T_r^{set} - T_{out,avg}) + L \quad (4)$$

The heat pump cycles ON and OFF with a deadband control on tank temperature, with lower and upper limits T_{tank}^{min} and T_{tank}^{max} aligned with T_{sup}^{set} plus or minus constant offsets to be tuned.

Design of experiment

In terms of parameter variations, a distinction is made between:

- Calibration parameters: uncertain parameters to be calibrated, related to the building, buffer tank and floor heating and summarized in Table 1
- Tuning parameters: control parameters to be tuned, which are related to heat pump controls and summarized in Table 2.

Table 1: Calibration (uncertain) parameters

PARAMETER	RANGE	UNIT
Tank effective volume	1.5 to 2.0	m ³
Tank effective height	1.5 to 2.5	m
Tank insulation thickness	0.05 to 0.15	m
Façade solar absorptivity	30 to 70	%
Radiant floor area as fraction of gross area	65 to 85	%

A number $n_{cs} = 20$ of sets of calibration parameter values and a number $n_{ts} = 20$ of sets of tuning parameter values are generated with Latin hypercube sampling (McKay et al., 1979), so as to obtain samples covering the respective parameter spaces effectively. Simulations are then carried out for all pairs $(i_{cs}, i_{ts})_{1 \leq i_{cs} \leq n_{cs}, 1 \leq i_{ts} \leq n_{ts}}$ of calibration parameter sets and tuning parameter sets, resulting in a matrix of n_{cs} by n_{ts} simulation runs.

Table 2: Tuning (control) parameters

PARAMETER	RANGE	UNIT
Heating curve slope S	0.6 to 1.0	-
Heating curve level L	1.0 to 3.0	K
Offset for switching off $T_{tank}^{max} - T_{sup}^{set}$	2.0 to 6.0	K
Offset for switching on $T_{tank}^{min} - T_{sup}^{set}$	-4.0 to 0.0	K
Night setback temperature difference	-4.0 to 0.0	K

Cost functions

A dimensionless cost function is defined in order to quantify the performance of the modeled system in terms of thermal comfort, energy use and equipment cycling. A degree hours criterion is chosen as the cost function for thermal comfort, as suggested in standard CEN/TR 16798-2 (CEN, 2019) and defined in Equation (5), with $\theta_{r,i}$ the simulated room air temperature at time step i , temperature limits $\theta_{r,min} = 21$ °C, $\theta_{r,max} = 25$ °C and a weight w_{tc} in (K.h)⁻¹.

$$C_{tc} = w_{tc} \sum_{i=1}^n (\theta_{r,min} - \theta_{r,i})^+ + (\theta_{r,i} - \theta_{r,max})^+ \quad (5)$$

The costs for energy use are assumed to be proportional to the electrical energy use of the heat pump with a constant unit cost w_{eu} in (W.h)⁻¹. The costs for cycling are assumed to be proportional to the number of cycles with a cost w_{cy} per cycle.

The total costs are defined as the sum of these three weighted costs, as in Equation (6).

$$C_{tot} = C_{tc} + C_{eu} + C_{cy} \quad (6)$$

Note that, while the indices have been omitted in the above equations, these costs are defined for each simulation run: $C_{tot}(i_{cs}, i_{ts})$. Given the relative subjectiveness of the selection of weights, three sets of weights corresponding to different priorities have been defined, as summarized in Table 3:

- A: focus on electricity use;
- B: focus on thermal comfort;
- C: focus on heat pump cycling.

Table 3: Cost function weights

WEIGHT	VALUE WEIGHT SETS			UNIT
	A	B	C	
w_{eu}	0.25	0.25	0.25	(W.h) ⁻¹
w_{tc}	2.0	10.0	4.0	(K.h) ⁻¹
w_{cy}	0.1	0.1	1.0	per cycle

Calibration metrics

Calibration metrics are calculated for the heat pump electrical power, which is assumed to be the only measured variable available for calibration.

The calibration metrics summarized in Table 4 are considered. All calibration metrics are expressed in such a manner that they take non-negative values and are equal to zero if the two compared vectors are equal. For instance, one looks at the absolute value of the mean bias error. The mean absolute percentage error often used in other contexts cannot be used because it becomes infinite in the presence of zero values in the reference vector, which is the case here. The frequently used metrics CVRMSE, NMBE and mean absolute error (MAE) are considered. Since costs are defined, the mean absolute error in cost of Equation (7) is also considered.

$$NMAEC = \frac{|C_{tot}(i_{cs}, i_{ts}) - C_{tot}(i_{cs, true}, i_{ts})|}{C_{tot}(i_{cs, true}, i_{ts})} \quad (7)$$

Table 4: Calibration metrics

METRIC	DESCRIPTION
<i>CVRMSE</i>	Coefficient of variation of the root mean squared error, see Equation ()
$ NMBE $	Absolute value of the normalized mean bias error, see Equation ()
<i>MAE</i>	Mean absolute error, see for instance (Willmott & Matsuura, 2005)
<i>NMAEC</i>	Normalized mean absolute error in cost, see Equation (7)

In addition, these metrics are calculated at several time intervals where applicable (averages over five minutes (5m), one hour (hr), one day(d)).

Interpretation

The synthetic data generated with the design of experiment described above are then investigated with the following approach: a set $1 \leq i_{cs, true} \leq n_{cs}$ of calibration parameters is assumed to contain the true values of the system. For each set of calibration parameters i_{cs} and for each pair of tuning parameter sets $(i_{ts,1}, i_{ts,2})$, the cost differences $\Delta C(i_{cs})$ and $\Delta C(i_{cs, true})$ can be determined as in Equation (8).

$$\Delta C(i_{cs}, i_{ts,1}, i_{ts,2}) = C_{tot}(i_{cs}, i_{ts,2}) - C_{tot}(i_{cs}, i_{ts,1}) \quad (8)$$

Additional costs with i_{cs} with reference to $i_{cs, true}$ are then equal to:

- zero if $\Delta C(i_{cs})$ and $\Delta C(i_{cs, true})$ have the same sign, which means the two alternatives of the pair are ranked correctly and the alternative with lower true cost is chosen;
- the absolute value of $\Delta C(i_{cs, true})$ otherwise, i.e. when the alternative with higher true cost is chosen.

Let $AAC(i_{cs, true}, i_{cs})$ be defined as the average of these additional costs over all pairs $(i_{ts,1}, i_{ts,2})$, divided by the sum of cost differences. This yields a value between 0 (costs ranked correctly for all pairs) and 100 % (costs ranked incorrectly for all pairs).

The correlation of interest to this paper is the one between $AAC(i_{cs, true}, i_{cs})$ and $\overline{D}_m(i_{cs, true}, i_{cs})$. As stated in Equation (9), \overline{D}_m is the mean over all tuning parameter sets of the discrepancy measured by metric m , where $D_m(y, \hat{y})$ is the value of the calibration metric for a ground truth vector y and a simulated vector \hat{y} , and $r(i_{cs}, i_{ts})$ is the vector of simulation results for calibration set i_{cs} and tuning set i_{ts} .

$$\overline{D}_m(i_{cs, true}, i_{cs}) = \sum_{i_{ts}=1}^{n_{ts}} D_m(r(i_{cs, true}, i_{ts}), r(i_{cs}, i_{ts})) \quad (9)$$

Moreover, a distinction is made between:

- the period for which the calibration metrics and \overline{D}_m are calculated, referred to as “calibration period”, even though calibration is not actually carried out here, but rather only represented by the choice of a calibration set i_{cs} already sampled with Latin hypercube sampling. This calibration period is taken to be either one of the three simulation weeks (W1, W2, W3) or the whole simulation period (total);
- the evaluation period, for which the costs (and AAC) are calculated. The evaluation period is taken to be the whole simulation period.

RESULTS

Results

Example results for two simulation runs are shown in Figure 3, and illustrate the difficulty of comparing data at sub-hourly time intervals. One may notice the broad early morning peak corresponding to the end of night setback, for which the two simulations are synchronized. During the day, some peaks can be seen to be similar but shifted in the two simulations.

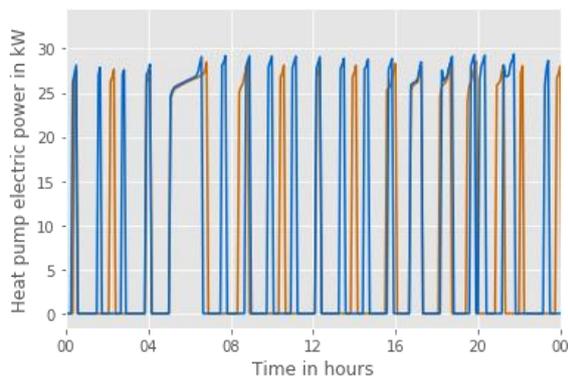


Figure 3: Heat pump electric power for one day at five-minute intervals, for two simulations

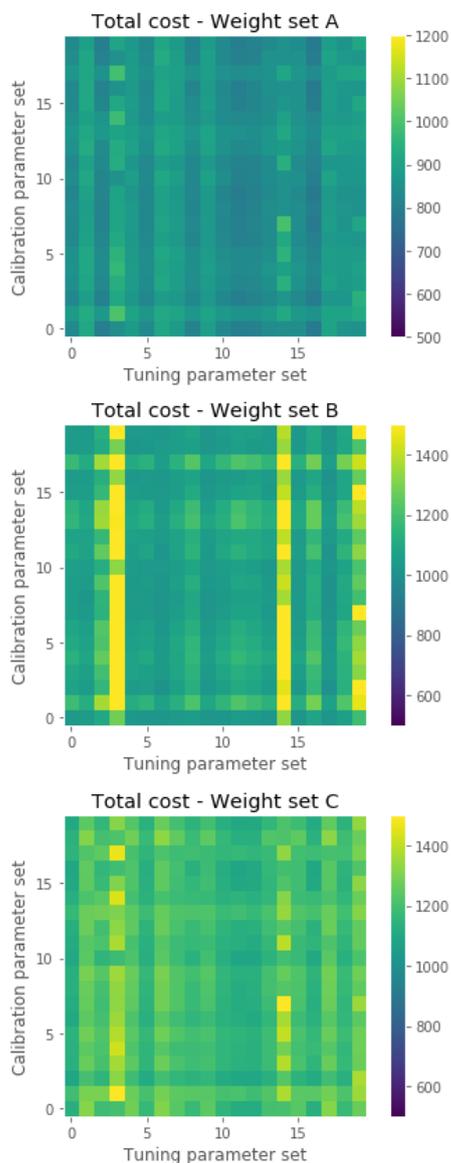


Figure 4: Total costs of the simulation runs

Figure 4 shows the total costs C_{tot} for the matrix of $n_{cs} \times n_{ts}$ simulation runs, for the three different weight sets. The costs of various sets of tuning parameters for a given set of calibration parameters correspond to a row on the diagram, while the costs

for a given tuning set correspond to a column. Linear patterns can be distinguished both in terms of tuning parameters (vertical lines) and calibration parameters (horizontal lines). These patterns can be seen to vary with the different weight sets. For weight set B, which gives priority to thermal comfort, two sets of tuning parameters generally leading to worse comfort results are recognizable as yellow vertical lines.

Figure 5 and Figure 6 show scatter plots of the mean calibration error \overline{D}_m against additional costs AAC for several metrics, providing a visual representation of the correlations of interest in this study. In absolute terms, the additional costs always remain below 20 %, which means that – within the bounds of the calibration uncertainty considered here – even uncalibrated models mostly lead to the right decision when comparing two sets of tuning parameters. The (0,0) point, corresponding to the ground truth model parameters, is noticeable for all metrics. Points near the line $y = 0$ correspond to models leading to near-optimal choices of tuning parameters, even though their goodness-of-fit may be low. More problematic are points near the line $x = 0$, corresponding to models with high additional costs despite a high goodness-of-fit. This can be observed especially for the normalized mean bias error in Figure 6. This confirms that a low value of the mean bias error does not imply a “good model”, as it may result from errors cancelling each other out. A similar observation can be made with CVRMSE at daily intervals. Mean squared errors and mean absolute errors at time intervals of one hour or five minutes are not affected by this issue, but most imperfect models have high mean errors (above half of the maximal value), which also limits the ability to discriminate between models of different qualities.

Correlations

As revealed by visual inspection of Figure 5 and Figure 6, there are patterns of association between AAC and \overline{D}_m , but these patterns are neither sharp nor clearly linear. Correspondingly, the Pearson correlation coefficient, which indicates the degree of linear dependence between the two quantities, takes positive but rather low values, up to 0.5, as reported in Figure 7. The correlation coefficients are lowest for the absolute value of the mean bias error and for CVRMSE with daily values. For the former, one might conclude to a total lack of correlation. The Pearson correlation coefficients are highest for the four metrics corresponding to mean absolute error and CVRMSE with five-minute (5m) and hourly (hr) intervals. Of these four metrics, MAE 5m seems to have the highest correlation with additional costs on average, but the difference does not seem significant in comparison to the deviations across calibration periods and across weight sets.

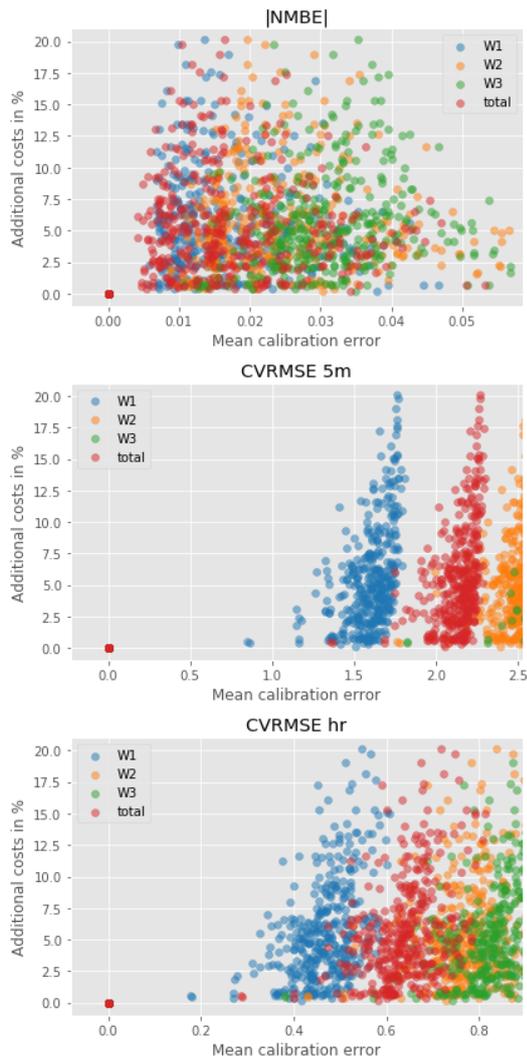


Figure 5: Scatter plot of mean calibration errors |NMBE| and CVRMSE against average additional costs (for cost weighting set A)

Beyond linear correlation, nonlinear dependence is also of interest. A monotonic relationship between values of a calibration metric and the additional costs related to model error, as revealed by high values of the Spearman's rank correlation coefficient (Hauke & Kossowski, 2011), would be a positive property of this calibration metric. Results in terms of Spearman's rank correlation coefficient are shown in Figure 8. They show that, in this respect, metrics calculated on the basis of five-minute values perform best, with the highest rank correlation coefficients for MAE 5m, followed by CVRMSE 5m.

Discussion

ASHRAE Guideline 14 (ASHRAE, 2002) provides criteria for the successful calibration of simulation models which are widely used. However, the relevance of calibration metrics for building simulation has not been subject to much scrutiny until now.

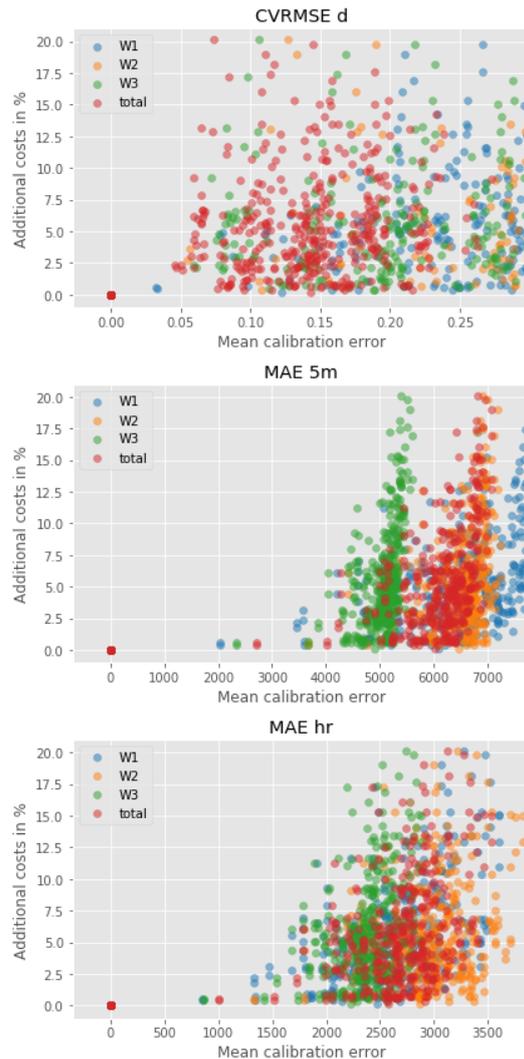


Figure 6: Scatter plot of mean calibration errors CVRMSE and MAE against average additional costs (for cost weighting set A)

In this paper, calibration metrics are compared by assessing their correlation with model usefulness in the context of using dynamic simulations to select control parameters for a heating system. Accordingly, the results about the usefulness of various metrics are valid in the presented case and not in general. Our results confirm the failure of the mean bias error alone to assess model quality in a useful way. They also show that calibration based on daily values is of limited use when tuning control parameters of the heating system. This is expected, as the most relevant time scale in the studied system is related to the loading and unloading of the buffer and clearly below one day. The use of sub-hourly values may bring additional challenges but more information. Metrics based on mean squared error or absolute error are shown to behave similarly, with a significant dependence on the time interval at which they are calculated. Mean absolute error shows better correlations with additional costs as mean squared error.

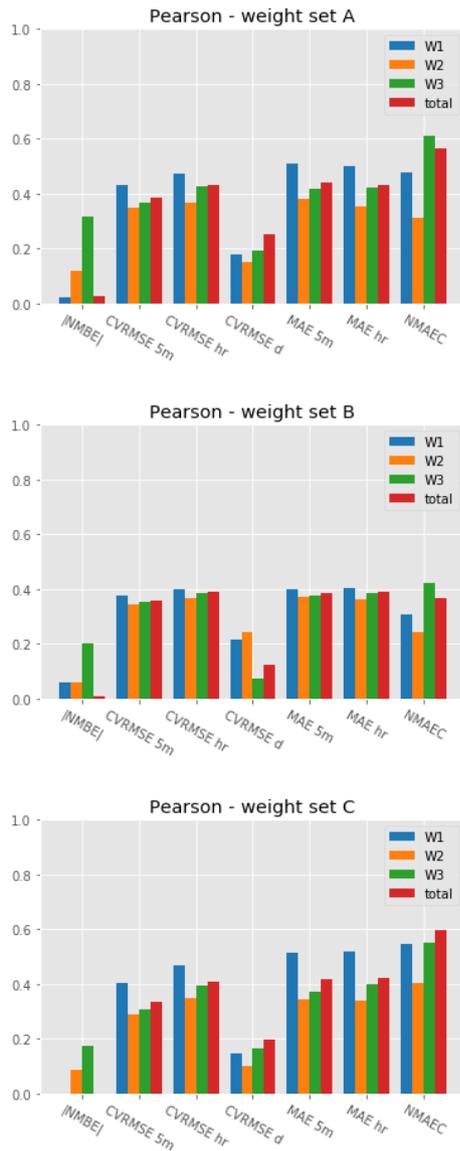


Figure 7: Correlations between AAC and \overline{D}_m in different periods, expressed as Pearson's correlation coefficients r

The results also illustrate the significant variations affecting calibration metrics calculated in different periods, and the importance of distinguishing calibration and evaluation periods. On another level, the rather low values of AAC reported in this study show that simulation generally yields useful insight even in the presence of parameter uncertainties. A similar approach may be applied to other simulation use cases, such as model predictive control and simulation-based selection of refurbishment options. An application to model predictive control would probably imply models of different structures, whereby complex simulation models may be used as test environments for simpler models with computational requirements adapted to optimization. Applying the approach to planning or refurbishment support might be more challenging, as other costs and functions not represented in simulation would have to be considered.

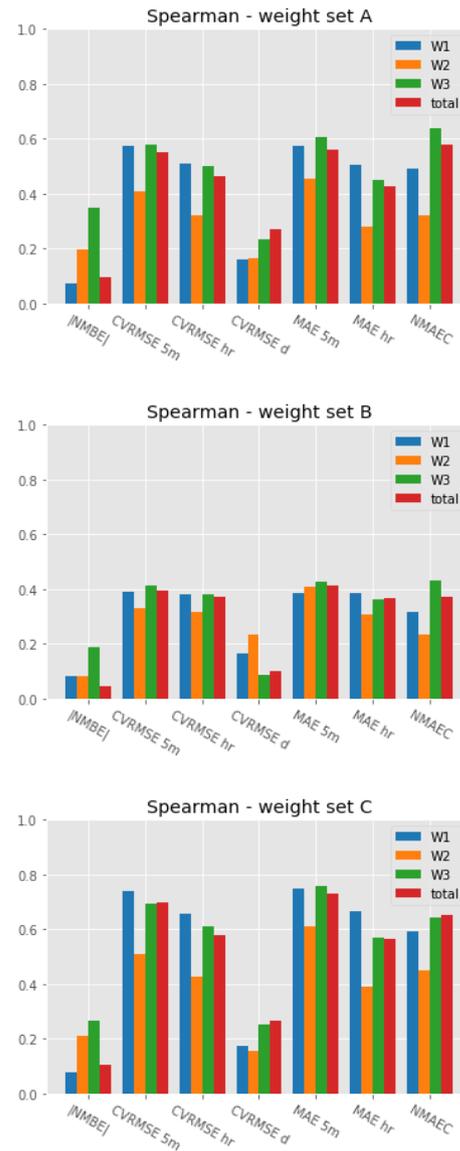


Figure 8: Correlations between AAC and \overline{D}_m in different periods, expressed as Spearman's rank correlation coefficient

The use of synthetic data, which makes these investigations possible, has some limitations, such as assuming a perfect model and ignoring measurement errors. We only considered parametric uncertainties, leaving aside the issue of model adequacy. Moreover, we accounted for a limited number of uncertain parameters. These limitations may be addressed in more extensive and elaborate experiments with synthetic data, for instance by considering more sources of uncertainties and simulating measurement noise. Still, experiments with real data may yield additional insight. This would imply not only measurements, but also interactions with a real system (in the present case changes in control parameters) which would have to be sufficiently monitored. Thus, experiments with real data would be significantly more expensive.

CONCLUSION

This paper proposes a new perspective on calibration metrics, by relating them to the usefulness of simulation models in specific cases, here the tuning of control parameters of a heating system. The approach is investigated on the basis of synthetic data obtained from combined variations of control parameters and uncertain calibration parameters. The results show moderate correlations between the values of calibration metrics and the average additional costs of decisions made with an imperfectly parametrized model. The correlations are shown to be particularly weak for mean bias error and errors calculated on daily values. Better correlations are obtained with mean absolute error calculated on hourly and sub-hourly time steps. Further research may investigate calibration metrics in different building performance simulation use case. Other metrics, which can for instance be obtained by filtering time series in various ways, may also be considered.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was performed within the SIM4BLOCKS project, funded from the European Union's Horizon 2020 research innovation program under grant agreement No. 695965.

REFERENCES

- ASHRAE. (2002). *ASHRAE Guideline 14 – Measurement of Energy and Demand Savings* (ASHRAE Guideline 14). ASHRAE.
- Box, G. E. (1979). Robustness in the strategy of scientific model building. In *Robustness in statistics* (S. 201–236). Elsevier.
- Bres, A., Amblard, F., Page, J., Hauer, S., & Shadrina, A. (2019). Now it looks more real—A Study of Metrics and Resolution for the Calibration of Dynamic Simulation. *Proceedings of the 16th IBPSA Conference*, 4609–4616.
- CEN. (2019). *CEN/TR 16798-2. Energy performance of buildings—Ventilation for buildings—Part 2: Interpretation of the requirements in EN 16798-1—Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*.
- Chaudhary, G., New, J., Sanyal, J., Im, P., O'Neill, Z., & Garg, V. (2016). Evaluation of “Autotune” calibration against manual calibration of building energy models. *Applied Energy*, 182, 115–134.
- Chong, A., Lam, K. P., Pozzi, M., & Yang, J. (2017). Bayesian calibration of building energy models with large datasets. *Energy and Buildings*, 154, 343–355.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.069>
- Encyclopedia of Mathematics. (2016). Metric. In *Encyclopedia of Mathematics*. Springer. <http://www.encyclopediaofmath.org/index.php?title=Metric&oldid=38939>
- Garrett, A., & New, J. (2016). Suitability of ASHRAE Guideline 14 Metrics for Calibration. *ASHRAE Transactions*, 122(1).
- Hauke, J., & Kossowski, T. (2011). Comparison of values of Pearson's and Spearman's correlation coefficients on the same sets of data. *Quaestiones geographicae*, 30(2), 87–93.
- Hyndman, R. J., & Koehler, A. B. (2006). Another look at measures of forecast accuracy. *International journal of forecasting*, 22(4), 679–688.
- Kim, S., & Kim, H. (2016). A new metric of absolute percentage error for intermittent demand forecasts. *International Journal of Forecasting*, 32(3), 669–679.
- Ljung, L. (1999). *System Identification—Theory for the User*. PTR Prentice Hall.
- McKay, M. D., Beckman, R. J., & Conover, W. J. (1979). Comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*, 21(2), 239–245.
- Reddy, T. A., Maor, I., & Panjapornpon, C. (2007a). Calibrating detailed building energy simulation programs with measured data—Part I: General methodology (RP-1051). *Hvac&R Research*, 13(2), 221–241.
- Reddy, T. A., Maor, I., & Panjapornpon, C. (2007b). Calibrating detailed building energy simulation programs with measured data—Part II: application to three case study office buildings (RP-1051). *Hvac&r Research*, 13(2), 243–265.
- Royapoor, M., & Roskilly, T. (2015). Building model calibration using energy and environmental data. *Energy and Buildings*, 94, 109–120.
- Wetter, M., Zuo, W., Nouidui, T. S., & Pang, X. (2014). Modelica buildings library. *Journal of Building Performance Simulation*, 7(4), 253–270.
- Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate research*, 30(1), 79–82.

BUILDING MODEL CALIBRATION METHODS FOR BUILDING OPERATION APPLICATIONS

F. Hengel¹, D. Jähnig¹, P. Nageler², R. Pertschy¹ and T. Weiss¹

¹AEE Intec, Gleisdorf, Austria

²EQUA Solutions AG, Zug, Switzerland

ABSTRACT

In order to make use of a dynamic simulation model even in the operational phase of a building, building model calibration is of great importance. This paper presents a first study in direction of such a building calibration for efficient use in practice: 1) key parameters were defined and a sensitivity analysis was carried out to identify the effects of parameter variations, and 2) different calibration methods were compared. The application of the methods at a Test-Box showed that key parameters can be used to calibrate a building model far more accurate than the requirements of the ASHRAE 14 guideline.

INTRODUCTION

In current practice building performance simulation is still almost exclusively used for design. However, it is expected that in the near future dynamic building models will support a more proactive building energy management during the whole operational phase.

First, discrepancies between simulated and measured values occur due to incomplete knowledge of the building or model assumptions (Heo, 2011). Such models need to be calibrated in an efficient way in order to identify the building's behavior properly. A simulation model can – if well calibrated – be applied to evaluate retrofit or usage behavior scenarios or operational changes of the heating systems.

Second, the simulation model – also called *digital twin* – can be coupled with the physical building in real time. Such a coupling opens up several possibilities:

- Specified goals can be controlled with the present boundary conditions and, if necessary, measures can be taken to achieve the target.
- Advanced control strategies such as model predictive control can be applied to minimize the real energy demand.
- In comparison to classical building monitoring, the simulation model offers much more extensive possibilities to record the condition of the building. These virtual

sensors can be used to replace real sensors or to record quantities that are difficult or costly to measure such as operative room temperature, other comfort values, heat fluxes or the exposure of the solar radiation to the workplace.

- The digital twin in building operation can also be used for operational diagnostics. Malfunctions of the system and energy wasting user behavior can be detected by comparing the measured values with the simulation results.
- The comfort conditions for users in conjunction with energy demand optimization can be improved by user interaction with the digital twin. For example, a person can be contacted that the lights can be turned off or the room air temperature will get too hot unless there is a certain user reaction. Subsequently, real thermal comfort can be increased or real energy consumption can be decreased.

The calibration process plays an important part in the establishment of a digital twin in building operation. Reddy et al. (2007) and Fabrizio (2015) classified the calibration process in four categories:

- First, the calibration can be performed *manually* in an iterative process.
- In addition to the manual calibration, the calibration results are displayed *graphically* in comparative diagrams.
- Calibration based on *analytical* and *test* procedures: In this method, in situ inspections as well as test, e.g. blower door tests, are applied.
- *Automated* calibration techniques

In this study, only automated calibration techniques are considered in order to minimize the calibration time. In the literature, several automated calibration studies exist. Monetti et al. (2015) proposed a method to calibrate a building model by varying the material properties as well as infiltration rate and internal gains

by means of the single objective optimization tool GenOpt (Wetter, 2001). Other studies (Delgarm et al. 2016) use multi-objective optimization algorithms in order to calibrate building energy performance.

The discrepancies between measured and simulated values are explained by Heo (2011) with four uncertainty categories:

- Uncertainties about the external environment such as the weather conditions and the building usage (occupancy) are referred to *scenario uncertainty*.
- The second category concerns about uncertainties in the building modelling called as the *building physics/operational uncertainty*. These uncertainties refer to the thermal-physical properties of the building envelope, the HVAC system as well as the internal gains and operation and control settings.
- *Model inadequacies* occur due to modelling assumptions, simplifications and ignored phenomena.
- Finally, *observation error* occurs due to data quality of the metered data.

The effects of the uncertainties can be evaluated in uncertainty and sensitivity studies (Saltelli et al., 1998). In external uncertainty methods, parameters are altered and the effects of their variation on the outputs are measured. In such studies, the largest influencing variables among the input data can be identified. This can help to deal with data gaps in the building modelling process. The parameters can be varied *one at a time* or *simultaneously*.

The discrepancy between the simulation results and the measurement data can be validated by means of metrics. The ASHRAE guideline 14 (2002) is commonly used to check if a simulation model is sufficiently accurate. This standard suggests that the hourly coefficient of variation of the root mean square error (CVRMSE) value for energy models must be less than 30% and the mean bias error (MBE) must be within $\pm 10\%$. Other standards such as the IPMVP (2003) recommend lower threshold values for the CVRMSE with 20% and the MBE with $\pm 5\%$. Other metrics such as the RMSE or the square error can also be used for calibration, but for these metrics no standard thresholds were found.

The sensitivity index can be used to screen the most influential parameters to the model output (Fabrizio & Monetti, 2015).

PAPER OBJECTIVES

The aim of this paper is to develop an adequate calibration method for the simulation model of a digital twin in building operation. The requirements for such a calibration method can be described as follows:

- The calibration process has to be automated in order to be efficient enough for practice.
- The calibrated model must accurate enough in order to reproduce the measured data within its uncertainties.
- The digital twin must react flexibly if the boundary conditions change. This means that the model must be able to recalibrate itself during operation.
- The digital twin has to be able to detect occupancy behavior properly.

This paper addresses the first and second requirement.

In the first section of the paper, the investigated calibration methods are explained. In these methods, input parameters for a thermal zone are identified as calibration key parameters and varied: Solar heat gain factor without shading, solar heat gain factor with shading, thermal inertia and thermal heat loss factor. The parameters are calibrated in order to find the values that lead to the smallest difference between measured and simulated air temperature.

In the second section, the calibration method is applied to a case study, in which measurement data of a Test-Box with three conditioned rooms were used. A sensitivity analysis was carried out in the detailed building simulation tool IDA ICE (EQUA, 2020) in order to identify the effects of key parameter variation. Different calibration methods with varying key parameters were compared. The calibration results are evaluated according to the ASHRAE guideline 14 and the square error.

CALIBRATION METHOD

The number of parameters will become very large when calibrating an entire building. To simplify first experiments, the calibration method is developed for a single thermal zone. Each thermal zone could later on be calibrated separately, or findings from one zone can be transferred to others. The building simulation environment IDA ICE is used in the calibration process, because it is a detailed validated simulation model that can be used at any level of detail for large-scale systems (Nageler, 2018). The variable timestep of the IDA solver speeds up the simulation by increasing the timestep during periods with little activity and shortens it for foreseeable events. This means that even short events such as window ventilation can be recorded accurately. Furthermore, the tool's integrated features such as *Parametric Runs*

for parameter studies, or *Graphical scripting* as an easy way of graphically supported automated modelling technique allow an automated calibration, that is made even more efficient through parallelization techniques. *Parametric Runs* supports parameter studies, in which the parameters can be varied either *one at a time* for sensitivity analysis or *simultaneously* for automatic optimization. For this study, the single objective optimization tool GenOpt (Wetter, 2001) was used.

Physical phenomena

A digital twin in building operation is particularly suitable for new buildings or for fundamentally renovated buildings. Usually there is little time between the completion of the construction work and the people moving in. This means that short periods for calibration must be sufficient in which all essential physical phenomena should be covered. Such periods in which no arbitrary user influence is present are essential for calibration in order to obtain a basic model, which takes the following physical phenomena into account:

- Any *heat transport* between zones as well as towards environment. This includes both heat conduction, thermal bridges as well as infiltration.
- Any *thermal inertia* of a zone. This means that the thermal mass of the system (zone air, furniture as well as internal and external constructions) influence the temperature change in the room.
- Any *heat gain by solar radiation*. Here it is relevant to distinguish between the solar gains with and without shading elements. In case of multiple and separately controlled shading elements, such a calibration needs to be repeated per window instead of per zone.
- Furthermore, local heating and cooling units and natural or mechanical ventilation affect state variables in a room.

Based on a model that is calibrated for periods without occupancy, one can try to detect any user behavior with algorithms. This can be supported with CO₂ sensors or by evaluating the temperature gradient in time. Such an algorithm is not part of this paper.

Key parameters

In order to keep the calibration method simple, the number of the calibrated parameters needs to be reduced. All parameters describing one of the physical phenomena mentioned above, are thus combined into one calibration parameter, called *key parameters*.

For the *calibration of the heat transport* from the room to adjacent rooms and to the environment, the physical material properties or the wall thickness can be varied. Varying thermal bridges or leaks to adjacent rooms and to the environment will have approximately the same effect. We will therefore combine all these parameters into one key parameter. In principle, there are two possible levels of details:

- i. The first option is to calibrate *each individual wall*. With this procedure the number of parameters to be calibrated is greater. Consequently, more calibration runs are required, which takes longer. The time needed for a calibration is an essential factor, since the aim is to calibrate also large buildings with many individual rooms. Furthermore, recalibration should also be carried out during operation. The probability is also higher that no global optimum is found. The *thermal conductivity* of the individual walls can be used as a key factor for modeling heat transport. On the other hand, the *heat capacity* or *wall thickness* can be used as a key factor to calibrate the inertia of the system. In order to reduce the number of key parameters, it is sufficient to use one heat transfer factor for all external walls.
- ii. The second option is to use one single heat transfer factor for the entire room. This shortens the time required for calibration enormously. However, the temperature conditions of the environment and the adjacent rooms have a significant influence on the calibration, since depending on the temperature, the heat flows can be reversed. Normally the heat transport to the environment has a much greater influence than the heat transport to adjacent rooms, because the temperature difference to the environment is much greater. This means that the heat flow to the environment can be calibrated with sufficient accuracy if the temperature conditions to the adjacent rooms remain similar. As soon as heat flows to adjacent rooms show a significantly higher contribution or the heat flows reverse, the simulation model will not fit anymore. If the deviation of the model to the reality is too large, the model must be recalibrated.

Instead of a total heat transfer coefficient that influences many input parameters, we use a simple *extra heat loss factor for thermal bridges* as our key parameter. In the same way, we use an *extra mass* as key parameter for the thermal inertia.

Which of the two levels of detail can be selected depends on the level of knowledge of the wall constructions. The wall constructions are often well known with materials and their layer thicknesses, but the far greater problem is often lack of information about thermal bridges and leaks. If the state of

knowledge is good, variant ii) can be chosen, otherwise variant i).

Next, the heat gain by solar radiation entering the room must be calibrated. A constant *solar heat gain coefficient* can be used here as a key parameter for the entire zone instead of calibrating the spectral data of each window glass separately.

Furthermore, shading elements reduce the amount of solar radiation entering the room. In this case, the solar heat gain coefficient is reduced by a *solar shading multiplier*.

Modelling method of the thermal zone

This paper describes a method in which each individual room is calibrated separately. The measured room air temperature of the adjacent thermal zone is set as boundary conditions. For this purpose, the convective heat transfer coefficient of the adjacent zone from the air to the wall can be set approximately constant. Omitting adjacent zones speeds up the simulation.

Calibration process

In this paper the tool GenOpt (Wetter, 2001) is used to support calibration. GenOpt is an open source tool, which provides single or multi parameter optimization by minimizing a single objective function. Other tools such as MOBO (Palonen et al., 2013) offer optimizations based on more objective functions, but this is not necessary in this case. Any metric (Ljung, 1998) that can evaluate the deviation between the simulated and measured values can be used as an objective function. Usually only the room air temperature is measured, sometimes in combination with the air humidity and the CO₂ concentration. Therefore, the room air temperature will be used to determine the state of calibration. For example, the square error or the CVRMSE and MBE recommended by ASHRAE can be used as metrics. The square error or the CVRMSE alone provides a good evaluation of the simulation model. The MBE alone is not sufficient to evaluate the simulation model, because it only determines a systematic deviation. A combination of the MBE with the CVRMSE can thus be used, where the respective metrics are added and/or weighted in an objective function.

The calibration can be carried out with a different number of calibration steps. The key parameters can be calibrated separately, several at once or all simultaneously. At least all parameters that belong to a certain physical phenomenon should be calibrated simultaneously, otherwise no global optimum can be determined. For stepwise calibration, a period in which each individual physical phenomenon is considered in isolation is crucial. If this is successful, a stepwise calibration is more accurate but slower. The effects of different calibration steps are shown in the chapter “Results and Discussion”.

EXPERIMENTAL SETUP

Test-Box

The Test-Box is located at AEE INTEC in Gleisdorf, Austria (15.709 East, 47.107 North), see Figure 1. The facility consists of two experiment rooms and a technical room hosting the air exchange system and the central PLC.

This research relied on measurement data from Room 2 (see R1, in Figure 1) only, which was used for the calibration study. External shading of the terrain and other facilities was taken into account. The façade with the embedded window faces south. The window is equipped with controllable venetian blinds between the glass planes. A door is installed in the north wall (towards the technical room). Ventilation of the Test-Box is assured by means of an air-handling unit, which can be operated either in supply air or exhaust air mode. In addition, heat can be supplied to the room by an electric radiator. Table 1 shows the thermal construction properties of Room 2 of the Test-Box.

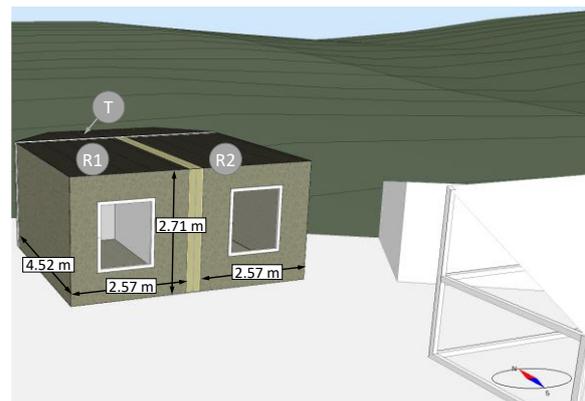


Figure 1: Model of the Test-Box with inner dimensions.

Table 1:
Construction overview of the Test-Box

	Thickness	Area	Mass	Mean	Heat	U-value
	m	m ²	kg	conductivity	capacity	
				W (m K) ⁻¹	kJ K ⁻¹ W m ⁻² K ⁻¹	
Ext. ceiling	0.448	11.62	1122	0.0508	1741	0.111
Ext. floor	0.533	11.62	1497	0.0548	2361	0.101
Ext. south wall	0.276	5.06	202	0.0400	327	0.141
Ext. east wall	0.405	12.25	942	0.0477	1470	0.115
Int. north wall	0.223	5.37	422	0.0670	714	0.284
Int. west wall	0.334	12.25	502	0.0399	749	0.117
Int. door	0.040	1.60	17	0.0940	29	1.617
Ext. window	-	1.90	0	-	-	0.960
Total	-	61.67	4703	-	7391	-

Measurement system and weather data

The Test-Box is equipped with numerous sensors that measures the temperature of the surfaces, the room air at 4 different heights and the operative room temperature. Temperatures are measured with Pt1000 sensors. Furthermore, the CO₂ concentration and the relative humidity are measured. The measurement data is available from 29.10.2019 to 7.1.2020. Figure 2 shows the measured room air temperature of the three rooms in the Test-Box.

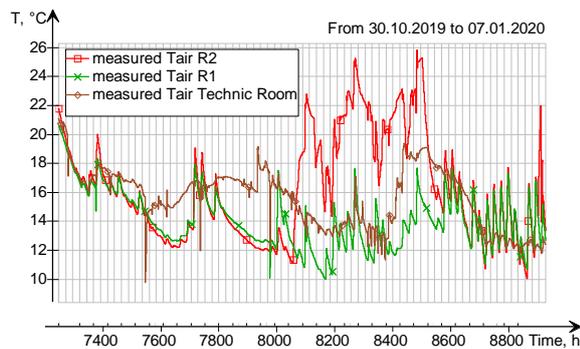


Figure 2: Measured room air temperature.

A weather station located next to the Test-Box and maintained by the AEE INTEC provides highly accurate weather data. The weather station measures the air pressure, the ambient air temperature, the relative humidity and the direct and diffuse solar radiation.

SIMULATION SCENARIOS

The scenarios are split into two parts. In all scenarios, Room 2 is modelled with one thermal zone, in which the temperatures of the neighboring rooms are set as boundary conditions. The actual wall constructions were converted into an equivalent wall layer regarding the thermal properties in order to reduce the number of calibration parameters. The constructions of the ceiling and floor are not calibrated, as the heat flows to the surroundings can as well be calibrated with the other two outer walls. First, a sensitivity analysis is performed, in which the influence of the key parameters are investigated. Second, the proposed calibration methods are tested based on the Test-Box facility. The evaluation interval is from 4.11.2019 to 7.1.2020. Ahead of the evaluation interval, lies a 6 days settling period. Figure 3 shows an overview of the Test-Box operation, in which a value 1 indicates that the action is executed. The solar radiation is also displayed. 0.4 means that the direct solar radiation exceeds 100 W per m².

Sensitivity analysis

In the sensitivity analysis, the thermal building model is based on the best knowledge of the modeler out of construction plans. Afterwards, the key parameters were varied +/-50% in order to see the effects of each key parameter.

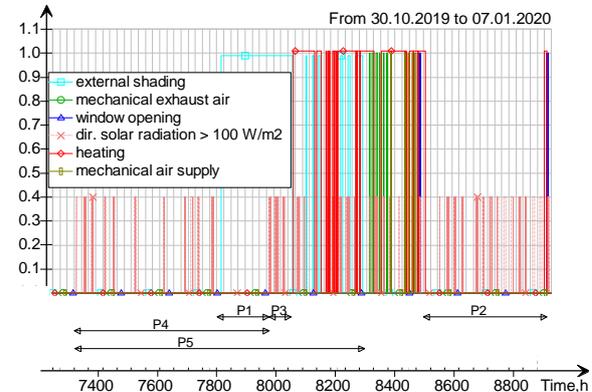


Figure 3: Overview Test-Box operation; direct solar radiation; calibration periods P1-6.

Calibration scenarios

Table 2:

Scenarios overview with selected key parameters and calibration periods.

Id	Description	Calib. step	Key parameters				
			Each int. wall λ	Each int. wall c _p	Extra heat loss	Air mass g	g _s
1	Slow calib. V1	1	P1	P1	P1	P1	
		2					P2
		3					P3
2	Intermediate calib. V1	1	P4	P4	P4	P4	
		2					P3
3	Simultaneous calib. V1	1	P5	P5	P5	P5	P5
4	Slow calib. V2	1			P1	P1	
		2					P2
		3					P3
5	Intermediate calib. V2	1			P4	P4	P4
		2					P3
6	Simultaneous calib. V2	1			P5	P5	P5

The calibration periods are shown in Figure 3 with P1-6. Table 2 shows six examined scenarios, in which a general distinction is made between the calibration of each internal wall (thermal conductivity λ; specific heat capacity cp) and an extra heat loss parameter to model the heat loss to ambient (V1 with Id's 1-3) and an overall heat loss parameter (V2 with Id's 4-6) in order to adjust the heat transfer with the ambient and the adjacent rooms. Furthermore, calibrations with a different number of calibration steps are examined and referred as *slow intermediate* and *fast*.

RESULTS AND DISCUSSION

Sensitivity analysis

Figure 4 shows the results of the sensitivity analysis in a parallel coordinate diagram. The figure shows four sub plots a-d), each showing the effects of one separate parameter on the error as color codes. The diagrams show that the variation of the g-value from the window has the greatest effect on the results, followed by the extra heat loss. Here, the recalibration of the g-value due to dirty windows during operation of the digital twin can be particularly useful. The variation of the air mass and the integrated shading, on the other hand, have little influence on the results.

Calibration scenarios

Table 3 gives an overview of the results of the scenarios. The table also shows the progress after each calibration step. Before the calibration starts the model has a square error of 6786, the CVRMSE of 9.399 % and the MBE of -10.02 %. In all scenarios the accuracy required by the ASHRAE standard can be achieved. The calibration of the g-value of the windows has the greatest influence on the accuracy. The two most effective methods are the simultaneous calibration with (3) or without (6) calibration of the internal walls. The results of these two scenarios are highlighted in grey. Due to the higher accuracy and the faster calibration, since only one step is necessary, a simultaneous calibration is preferred, but one must be aware that a different choice of calibration periods can

lead to improved results in stepwise calibration. Furthermore, the higher accuracy can be explained on the one hand by the longer calibration period and on the other hand by the fact that not all physical phenomena can be considered in isolation in the individual calibration steps. For example, there are rarely long periods without solar radiation during which only heat transport can be calibrated. Furthermore, the inertia of the thermal zone must be taken into account already during the calibration of the heat transport to the environment, but the largest dynamics occur only with solar irradiation. This indicates a more accurate calibration if all key factors are calibrated together. The additional calibration of the heat transport over the internal walls by means of conductivity and specific heat capacity does not show a significant improvement of the results even with large temperature differences between the rooms (see Figure 2). The reason for this is that in the selected calibration period P5 in V1 the heat transport to adjacent rooms cannot be calibrated with sufficient accuracy because the temperature difference between the rooms was too small and was covered by other physical phenomena. During the evaluation period, there were deviations between simulation and measurement because a significant heat flow between the rooms occurred. This temperature difference between the rooms, in order to achieve a better calibration result, could also be artificially induced by targeted heating.

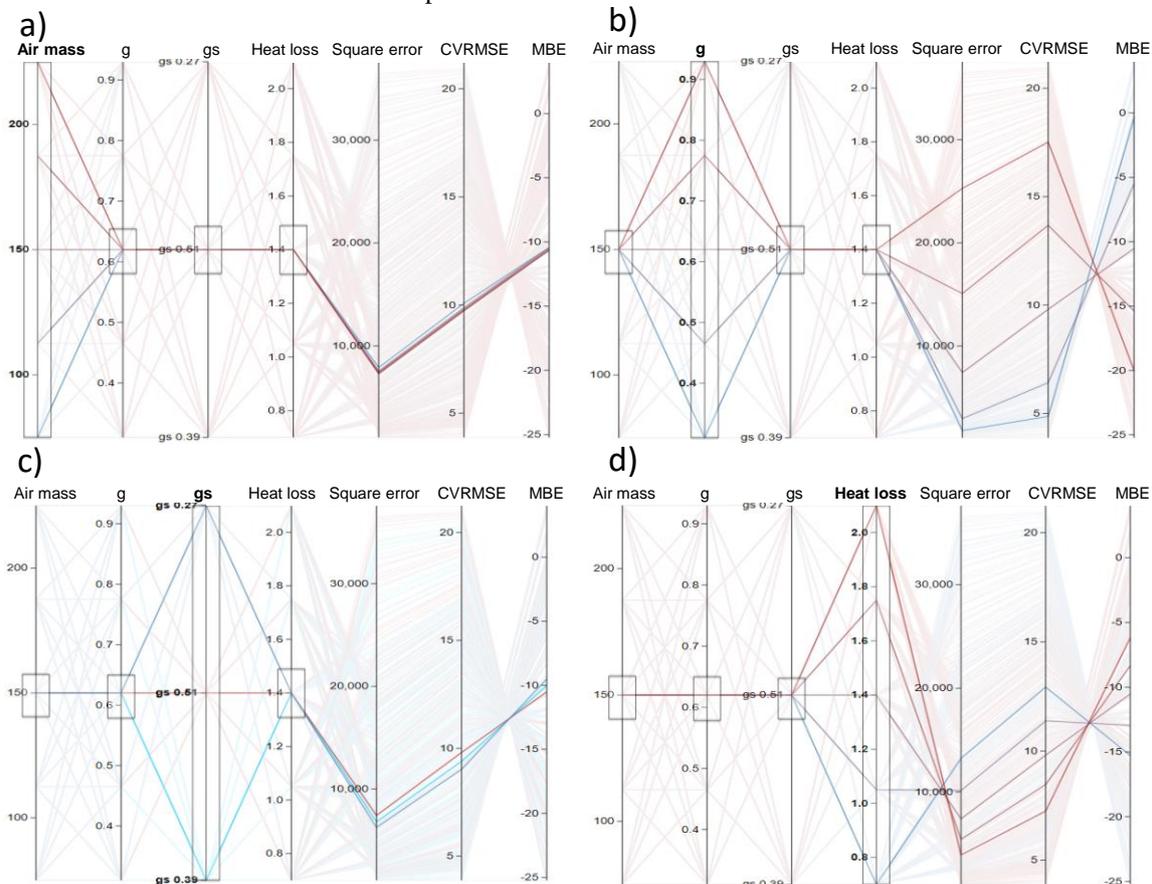


Figure 4: Results of the sensitivity analysis; each subplot shows the effects of the highlighted key parameter as color codes

*Table 3:
Overview simulation results.*

Scenarios		Results			
Id	Description	Calib. step	Square error	CVRMSE(%)	MBE(%)
1	Slow calib. V1	1	4006	7.38	-8.57
		2	723	1.57	-0.23
		3	646	3.20	-1.82
2	Intermediate calib. V1	1	924	3.90	-4.12
		2	801	3.66	-3.95
3	Simultaneous calib. V1	1	306	2.18	-0.93
4	Slow calib. V2	1	1524	4.69	-4.74
		2	424	2.35	-0.10
		3	414	2.24	0.18
5	Intermediate calib. V2	1	438	2.61	-1.37
		2	395	2.42	-1.06
6	Simultaneous calib. V2	1	316	2.21	-0.78

The calibration progress of the two most accurate and effective methods with Scenario 3 and 6, in which all key parameters are varied simultaneously, are shown in Figure 5. The results show that the calibration algorithm finds a solution close to the optimum with about 100 runs relatively quickly and needs approximately another 100 runs to find the optimum and then aborts the algorithm. The optimum can be found comparably quickly in both variants. However, the results in Scenario 3 are insignificantly more accurate, as the heat transport via internal walls is calibrated.

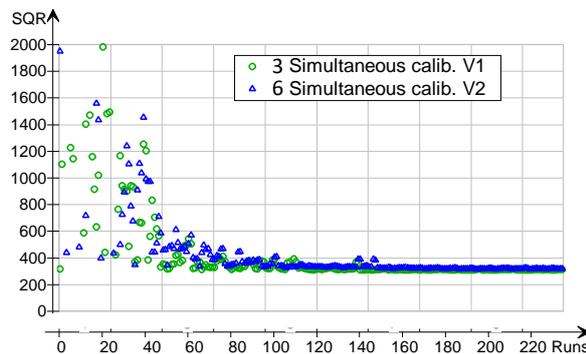


Figure 5: GenOpt calibration of scenarios 3 and 6: Number of runs vs. square error SQR.

Figure 6 shows the results out of the calibration process in GenOpt. The figure shows the square error of scenario 6 as a function of the extra heat loss on the x-axis, the air mass as area, the integrated window shading as shape and the solar heat gain coefficient g as color code.

In Figure 7 the effects of the g -value variation on the results can be seen more clearly by showing the g -value on the x-axis and the extra heat loss as a color code.

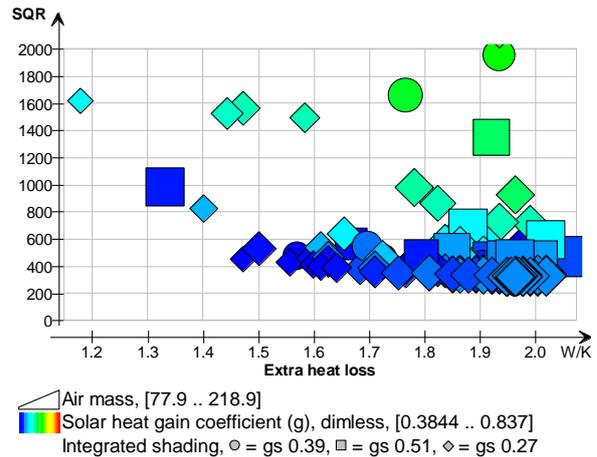


Figure 6: GenOpt calibration of scenario 6: Square error SQR in dependence of the key parameters.

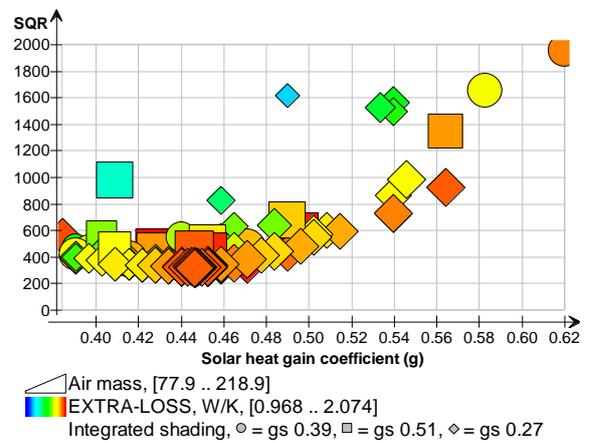


Figure 7: GenOpt calibration of scenario 6: Square error SQR in dependence of the g -value.

Figure 8 shows the comparison of the measured and simulated room air temperature of Room 2 of simulation scenario 3. The simulation results show a good agreement compared with the measurement data, especially if no mechanical airflow is present, in which the leak for ventilation is open, see Figure 3. The solar irradiation can also be modelled very well, see P2 in Figure 3.

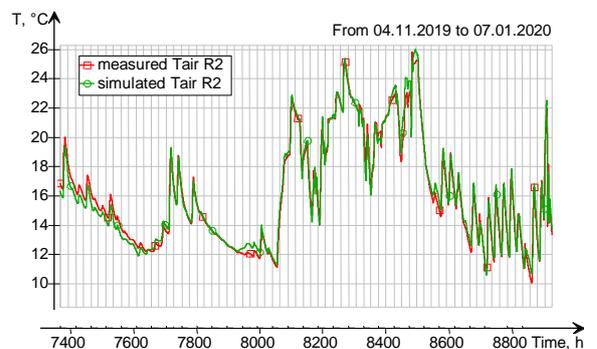


Figure 8: 3 Simultaneous calib. V1: Measured and simulated room air temperature.

CONCLUSION

This paper presents and discusses several calibration methods, which can be applied to a digital twin in building operation. Key parameters are thus defined, which can be used to calibrate the thermal heat transfer with the ambient and the surrounding rooms, the thermal inertia of the room, the solar irradiation, the integrated shading device and the natural ventilation. The results show that the best key parameter combination is to use an overall extra heat loss and the air mass to model the heat exchange and the thermal inertia, the g-value and a multiplier for the shading device for the solar irradiation. The choice of calibration periods has a significant influence on the result. With an improved choice of calibration methods, the result could be further improved. If it is possible to define periods in which each physical phenomenon can be considered in isolation, a stepwise calibration is probably more accurate but slower. Such calibration scenarios were implemented in the simulation environment IDA ICE, which provides optimization using the integrated features *Graphical script* and *Parametric Runs* coupled to GenOpt. IDA ICE also uses a pressure-driven calculation method of the air flows through windows that is important to capture the occupancy behavior. The results show an excellent agreement of the measurement data and the simulation results.

OUTLOOK

The calibration methods and key parameters presented in this paper can be used and applied to a digital twin for building operation applications. The next step is the calibration of whole buildings. Therefore, it is essential to detect the occupancy by means of artificial intelligence based on CO₂ concentrations and user patterns. Furthermore, it is necessary to define the applications for the digital in building operation and develop its interfaces to the users such as building users and facility managers. The real time measurement and set point data exchange is already implemented in IDA ICE.

ACKNOWLEDGEMENT

Research leading to these results has received funding from the EU ECSEL Joint Undertaking under grant agreement n° 826452 (project Arrowhead Tools), from the partners national programs/funding authorities and the Austrian funding scheme ‘Stadt der Zukunft’ (project Digitaler Zwilling, funding no. 867345).

REFERENCES

- ASHRAE. 2002. ASHRAE Guideline 14-2002: Measurement of Energy Demand and Savings. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- EQUA. 2020. IDA ICE. <https://www.equa.se/en/>
- Delgarm, N., Sajadi, B., Kowsary, F., Delgarm, S. 2016. Multi-objective optimization of the building energy performance: A simulation-based approach by means of particle swarm optimization (PSO). *Applied Energy* 170, 293–303.
- Fabrizio, E., Monetti, V. 2015. Methodologies and Advancements in the Calibration of Building Energy Models. *Energies* 8 (4), 2548–2574.
- IPMVP New Construction Subcommittee. 2003. International Performance Measurement and Verification Protocol: Concepts and Option for Determining Energy Savings in New Construction, Volume III; Efficiency Valuation Organization (EVO): Washington, DC, USA
- Heo, Y. 2011. Bayesian calibration of building energy models for energy retrofit decision-making under uncertainty. PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA.
- Monetti, V., Davin, E., Fabrizio, E., André, P., Filippi, M. 2015. Calibration of building energy simulation models based on optimization: a case study. *Energy Procedia* 78, 2971–2976.
- Nageler, P., Schweiger, G., Schranzhofer, H., Mach, T., Heimrath, R., Hochenauer, C. 2018. Novel method to simulate large-scale thermal city models. *Energy* 157, 633–646.
- Palonen, M., Hamdy, M., Hasan, A. 2013. MOBO a new Software for Multi-objective Building Performance Optimization, In: Proceedings of BS2013, Chambéry, France.
- Reddy, T.A., Maor, I., Panjapornpon, C. 2007. Calibrating detailed building energy simulation programs with measurement data—Part II: Application to three case study office buildings (RP-1051). *HVAC&R Res* 13, 221–241.
- Saltelli, A., Bolado, R. 1998. An alternative way to compute Fourier amplitude sensitivity test (FAST). *Comput. Stat. Data Anal.* 26, 445–460.
- Wetter, M. 2001. GenOpt – A Generic Optimization Program. In: Proceedings of 7th International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil.

A

Agudelo, Julian
Aimer, Dominik
Akin, Şahin
Albrecht, Stefan
Alfonso, Maria Paula
Allan, James
Amblard, Frédéric
Auer, Thomas

B

Banihashemi, Farzan
Bano, Polikseni
Benndorf, Gesa Angelika
Benner, Joachim
Betzold, Christina
Bischof, Julian
Blank-Landeshammer, Brigitte
Blatt, Christian
Blum, Tobias
Bogischef, Lea
Bohne, Dirk
Bordin, Susanna
Bourreau, Pierre
Brembilla, Eleonora
Bres, Aurelien
Breuss, Samuel
Büchner, Daniel

C

Caemmerer-Seibel, Uwe
Carrigan, Svenja
Cebulla, Daniel
Charbel, Nathalie
Chhugani, Bharat
Chuchra, David
Cody, Brian
Conrad, Christian
Corcoran, Katja
Costa, Andrea
Cremers, Jan

D

Dahash, Abdulrahman
Di Angelis, Enrico
De-Borja-Torrejón, Manuel
Dentel, Arno
Dermentzis, Georgios
Dervishi, Sokol
Deutschmann, Daniel
Di Bari, Roberta
Dino, İpek Gürsel

E

Eberl, Alexander
Ebertshaeuser, Sebastian
Eckersdorfer, Lisa
Eckstädt, Elisabeth
Ehrenwirth, Mathias
Elagiry, Mohamed
Elgheriani, Lobna
Engelmann, Peter

F

Fallmann, Simon
Fechner, Heiko
Ferreiro Sistiaga, Ane
Fisco, Stefano
Frenzel, Christian
Freund, Svenne
Frisch, Jérôme
Frison, Lilli

G

Ganji Kheybari, Abolfazl
Geiger, Andreas
Giovannetti, Federico
Glahn, Oliver
Gratzl, Markus
Grunewald, John
Gumhalter, Michael
Gutierrez, Antonio

H

Haase, Walter
Hagenmeyer, Veit
Harhausen, Gunnar
Harmathy, Norbert
Harter, Hannes
Hauer, Martin
Hauer, Stefan
Heendeniya, Charitha Buddhika
Hemmerle, Claudia
Hengel, Franz
Hentschel, Alexander
Herker, Sebastian
Heschl, Christian
Hirth, Stephan
Hoffmann, Sabine
Hopfe, Christina
Horn, Rafael
Hoxha, Endrit
Hummel, Sebastian

I

Ihlenburg, Moritz
Inschlag, Franz
İşeri, Orçun Koral

J

Jähnig, Dagmar
Jansen, David
Jayapalan Nair, Renjith
Jemini, Floriana
Joost, Jan-Niklas
Jorgji, Olivia

K

Kalmbach, Silas
Kandasamy, Kutralingam
Karlapudi, Janakiram
Kaul, Werner
Kempkes, Christoph
Kierdorf, Daniel
Kiesel, Gerd
Kirchner, Maik
Kirnats, Lev
Kishali, Emre
Klanatsky, Peter
Kogler, Klaus
Köhler, Benjamin
Köhler, Sally
Kornadt, Oliver
Kraft, Alice
Krämer, Ben
Krause, Harald
Kreulitsch, David

L

Lampe, Carsten
Lang, Werner
Langer, Marina
Langner, Verena
Lauss, Lukas
Lebert, Judith
Leonhardt, Marie
Liebhart, Heiko
Littwin, Matthias

M

Maas, Anton
Madjidi, Madjid
Magni, Mara
Maierhofer, Dominik
Malhotra, Avichal
Mardaljevic, John
Mathur, Kushagra
Mehnert, Jan
Menzel, Karsten
Mercker, Oliver
Miller, Josef
Mirbach, David
Monsberger, Micheal
Moosberger, Sven
Mork, Maximilian
Mortimer, Marc
Moser, Felix
Müller-Eping, Thorsten
Müller, Dirk
Murschetz, Julian
Muschik, Sebastian

N

Nageler, Peter
Nichersu, Alexandru
Nicolai, Andreas
Nouri, Amin
Nürnberg, Markus
Nytsch-Geusen, Christoph

O

O'Donnell, James
Ochs, Fabian

P

Paepcke, Anne
Pärisch, Peter
Passer, Alexander
Pauen, Nicolas
Pawar, Priya
Pertschy, Reinhard
Pfluger, Rainer
Plank, Helmut
Platzek, Dieter

R

Rädler, Jörg
Raming, Simon
Ramschak, Thomas
Réhault, Nicolas
Reiter, Thomas
Rida, Mohamad
Rist, Tim
Roggenkamp, Henning
Rojas, Gabriel
Rosebrock, Oliver
Rüdissler, Daniel
Ruhsam, Christoph
Ruisinger, Ulrich

S

Schäuble, Jakob Emanuel
Schlütter, Dominik
Schmitz, Gerhard
Schmitz, Hans Jürgen
Schneider, André
Schöny, Michael
Schrag, Tobias
Schranz, Thomas
Schröter, Bastian
Schumann, Falk
Schweiger, Gerald
Schwengler, Thomas
Schwickert, Susanne
Seifert, Caroline
Shadrina, Anna
Shavarebi, Kamran
Siemon, Matthias
Siwiecki, Jaroslaw
Sobek, Werner
Sporr, Andreas
Stumpf, Juan-Pablo

T

Tosatto, Alice
Türkmenoğlu Bayraktar, Neslihan

U

Unger, Lukas

V

van Treeck, Christoph
Venturi, Elisa
Venus, David
Vering, Christian
Veynandt, François
Völker, Conrad
Vollmer, Michael
von Both, Petra
von Raven, Christine
Voss, Karsten
Voß, Tjado
Vukadinovic, Mario

W

Walther, Karl
Weiß, Tobias
Wieder, Stefanie
Wilken, Thomas
Wirnsberger, Markus
Wu, Xiaoying

X

Xhonneux, André

Y

Yalçın, Esra Eres

Z

Zhang, Deyin
Zucker, Gerhard
Zuhaib, Sheik

Platinum Sponsor



Supported by

 Bundesministerium
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie



Partners

