



# **Modellierung eines Büroraumes mit multifunktionaler Fassade**

**Diplomarbeit**

von

Martin Alexander Waser

als Diplomarbeit der Kommission zur Abhaltung  
der dritten Diplomprüfung

der Studienrichtung Maschinenbau an der  
Technischen Universität Graz

über das Institut für Wärmetechnik vorgelegt.

Betreuer:

Dipl.-Ing. Dr.mont. Hermann Schranzhofer

Dipl.-Ing. Dr.techn. Richard Heimrath

Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Wolfgang Streicher

Graz, September 2010

---

## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

---

Ort, Datum

---

Martin Alexander Waser

---

## Danksagung

Diese Diplomarbeit entstand im Zuge des fünfjährigen Forschungsprojekts Multifunktionelle Plug and Play Fassade am Institut für Wärmetechnik an der Technischen Universität Graz.

Dem stellvertretenden Institutsvorstand, Herrn Wolfgang Streicher, danke ich für die Möglichkeit meine Abschlussarbeit in diesem Projekt durchführen zu dürfen. Weiters möchte ich mich besonders bei Herrn Hermann Schranzhofer und Herrn Richard Heimrath für die engagierte Betreuung recht herzlich bedanken.

Der gesamten Arbeitsgruppe Energieeffiziente Gebäude gilt der Dank für das Interesse an meiner Arbeit und der Unterstützung bei offenen Fragestellungen. Für das sehr familiäre und freundliche Arbeitsklima am Institut bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen.

Außerdem danke ich meiner Familie sowie meiner Freundin für die Unterstützung.

Das Projekt MPPF (Projektnummer 815075) wurde im Rahmen des Comet-Programmes gefördert. Besonderer Dank gilt den Fördergebern BMVIT, FFG, Land Steiermark, Land Niederösterreich und Land Kärnten.

Graz, im September 2010

Martin Alexander Waser

---

## Kurzfassung

Im Rahmen des Projektes “Multifunktionelle Plug and Play Fassade (MPPF)” beschäftigt sich diese Diplomarbeit mit der thermischen Simulation eines ersten - am Standort Stallhofen bereits installierten - Prototypen für eine multifunktionelle Fassade. In diese Fassade sind zwei verschiedene thermische Kollektoren, drei unterschiedliche Photovoltaikmodule und ein dezentrales Lüftungsgerät integriert. Die Arbeit kann in drei Schritte unterteilt werden:

Im ersten Teil wird der vorgesehene Raum möglichst detailliert und modular mit der Standardfassade in der Simulationsumgebung abgebildet. Untersucht werden Komfortparameter, Energiebilanzen und Energiebedarf bei einigen Variationen. Im zweiten Teil werden die Funktionselemente (Solarthermie, PV, HLK), wie sie in Stallhofen bereits eingebaut wurden, möglichst genau in das Modell integriert. Studiert werden hier die Auswirkungen auf die im ersten Teil berechneten Parameter aufgrund der geänderten Materialparameter im Wandaufbau. Die Anlagensimulation wird im letzten Teil betrachtet. Auf eine detaillierte Modellierung der Anlage wird hier verzichtet, da der Fokus auf der Gebäudesimulation liegt. Der Ertrag aus der solarthermischen Kollektoren und den Photovoltaikmodulen wird nicht im Detail betrachtet. Ziel ist ein Modell für die thermische Gebäude- und Anlagensimulation, welches in weiterer Folge mit vorhandenen Messdaten validiert werden kann. Dadurch ist es künftig möglich, Parameterstudien der fassadenintegrierten Komponenten hinsichtlich Ertrag und Raumkomfort des Gebäudes durchzuführen.

Für die Aufgabenstellung wird TRNSYS 17 als Simulationsumgebung verwendet. Mit einem Plugin in Google SketchUp kann eine dreidimensionale Gebäudegeometrie entworfen werden, welche in der Simulation berücksichtigt wird. Dadurch ist es erstmals möglich, interne und externe 3D-Verschattung und 3D-Strahlungsverteilung in TRNSYS zu berücksichtigen. Der Einfluss des neuen Strahlungsmodelles wird zu Beginn an einer einfachen Geometrie untersucht. Bei der Gebäudesimulation wird jede Komponente als eigener Wandaufbau betrachtet, da sich die Temperaturverläufe in den Komponenten von jenen in normalen Wandaufbauten stark unterscheiden können (z.B. bei Stagnation des thermischen Kollektors). Die Anlagensimulation wird ebenfalls mit TRNSYS durchgeführt und liefert vom jeweiligen Anlagenzustand die Temperaturen in den Komponenten als Input für die Wandaufbauten.

Die ersten Ergebnisse zeigen, dass die MPPF-Module die Energiebilanz im Jahresverlauf nur geringfügig beeinflussen. Dies liegt daran, dass die Module großteils ähnliche U-Wert wie die ursprünglichen Fassadenelemente haben. Hinter den Modulen können jedoch kurzzeitig Temperaturniveaus auftreten, die nicht mehr als behaglich empfunden werden. Dies ist im Spätsommer der Fall, wenn der Fassadenkollektor in Stagnation geht, bzw. im Winter wenn bei sehr kalten Außenluftzuständen am HLK-Gerät die Oberflächentemperatur so stark abfällt, dass Kondensation auftritt. Diese Probleme müssen beherrscht werden, wobei mit Hilfe der Simulationstechnik und dem vorliegendem Modell an der Problemlösung gearbeitet werden kann.



---

## Abstract

This diploma thesis was a part of the five year projekt “Multifunctionel Plug and Play Façade (MPPF)” at the Institute of Thermal Engineering, Graz University of Technology. It shows a concept of a detailed thermal simulation of an office room equipped with a multifunctional façade. The multifunctional modules which are placed in the façade are a thermal solar panel, an opaque photovoltaic panel, semitransparental photovoltaic cells built in a glazing, an electrochromic glazing and a HVAC module. Such a system was built up at the “Hans Höllwart - Forschungszentrum für integrales Bauwesen AG” (FIBAG) researchlab. For the simulation model the parameters of the real prototype were used as boundary conditions.

First of all, the office room is built up with his standard façade to do case studies. This scenario is the base for the modelling of the multifunctional modules. The third part deals with the simulation of the technical facilities of the building.

As simulation environment the new version TRNSYS 17 was used, where a plugin for Google SketchUp allows to construct a three dimensional model of the building. With the information of the geometry it is possible to use a new radiation model. This model calculates the distribution of the longwave radiation inside the room depending on a view factor matrix. It is also possible to take the shadowing of the direct and diffuse radiation (because of a subsidiary building) better into consideration.

Each multifunctional module is observed as an own wall construction, to investigate the different temperature profiles in the wall. In case of stagnation of the thermal collector circuit, the temperature profile of the solar thermal collector differs a lot compared to the standard module.

First results show that the thermal energy demand per year of the MPPF-façade is similar to the thermal energy demand of the standard façade. As assumed the surface temperature between MPPF and standard façade differs in some cases a lot. Especially behind the thermal collector when the system is in stagnation and behind the HVAC-module, when the outside temperature is very low. In focus of the thermal comfort, such conditions must be avoided. With the simulation technology it is possible to investigate such problems and work on solutions for the future.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Hintergrund . . . . .	1
1.2. Motivation . . . . .	3
1.3. Ziele dieser Arbeit . . . . .	3
1.4. Vorgehensweise . . . . .	5
<b>2. Grundlagen</b>	<b>6</b>
2.1. Thermische Gebäudesimulation . . . . .	6
2.2. TRNSYS 17 . . . . .	6
2.2.1. Aufbau . . . . .	6
2.2.2. Gebäudesimulation . . . . .	8
2.2.3. Simulationsmethodik . . . . .	12
2.2.4. Grenzen der dynamischen Simulation des thermischen Gebäudeverhaltens mit TRNSYS . . . . .	12
2.2.5. Möglichkeiten der dynamischen Simulation des thermischen Gebäudeverhaltens mit TRNSYS . . . . .	14
2.2.6. Einfluss der unterschiedlichen Strahlungsmodelle . . . . .	15
<b>3. Beschreibung und Modellierung des Fassadenprüfzentrums</b>	<b>18</b>
3.1. Beschreibung des Büroraumes ohne multifunktionaler Komponenten . .	20
3.2. Modellierung des Büroraumes ohne multifunktionaler Komponenten . .	22
3.3. Nutzungsrandbedingungen . . . . .	28
3.4. Fassadenintegrierte Komponenten . . . . .	30
3.4.1. Solarthermischer Kollektor . . . . .	33
3.4.2. Photovoltaikmodule . . . . .	38
3.4.3. HLK-Gerät . . . . .	39
3.4.4. Elektrochrome Verglasung . . . . .	42
<b>4. Anlagenmodellierung</b>	<b>45</b>
4.1. Kollektorkreislauf . . . . .	45
4.1.1. TRNSYS Type Kollektor . . . . .	46
4.1.2. TRNSYS Type Solarwärmespeicher . . . . .	47
4.1.3. TRNSYS Type Pumpe . . . . .	47
4.1.4. TRNSYS Type Steuereinheit . . . . .	48
4.2. HLK-Gerät . . . . .	48

<b>5. Aufbau der TRNSYS-Simulation</b>	<b>50</b>
5.1. Control Card . . . . .	50
5.2. Makro Wetterdatenleser . . . . .	51
5.3. Gebäude Type 56 . . . . .	52
5.4. Makro Kollektorkreislauf . . . . .	52
5.5. Makro HLK-Gerät . . . . .	52
5.6. Makro Steuerung-Vent-Licht-Heiz-Luft . . . . .	53
5.7. Makro Auswertung . . . . .	53
<b>6. Ergebnisse</b>	<b>54</b>
6.1. Simulationsergebnisse des Büroraumes mit Standardfassade . . . . .	54
6.1.1. Szenario 1 - Basisvariante . . . . .	55
6.1.2. Szenario 2 - unlimitierte Kühl- und Heizleistung . . . . .	56
6.1.3. Szenario 3 - altes Strahlungsmodell . . . . .	58
6.1.4. Szenario 4 - Vernachlässigung der Gebäudeeigenverschattung . . . . .	59
6.1.5. Szenario 5 - Untersuchung von außen angebrachten Verschattungs- vorrichtungen . . . . .	59
6.1.6. Szenario 6 - Einfluss der Gebäudeausrichtung . . . . .	60
6.2. Simulationsergebnisse des Büroraumes mit multifunktionaler Fassade . . . . .	61
6.2.1. Szenario 7 - Basisvariante mit MPPF Komponenten . . . . .	62
6.2.2. Szenario 8 - Basisvariante mit MPPF Komponenten mit Standard Strahlungsmodell . . . . .	64
6.2.3. Vergleich der Szenarien . . . . .	64
6.3. Vergleich der Oberflächentemperaturen von Standard- und MPPF Fassade . . . . .	65
6.3.1. Temperaturvergleich 1 - Oberflächentemperatur im Winter . . . . .	65
6.3.2. Temperaturvergleich 2 - Oberflächentemperatur im Sommer . . . . .	67
6.4. Erster Vergleich der Oberflächentemperaturen der MPPF-Fassade zwi- schen Simulation und Messung . . . . .	68
6.4.1. Wetterdaten . . . . .	68
6.4.2. Messdaten der MPPF-Fassade . . . . .	69
6.4.3. Vergleich zwischen Simulation und Messung . . . . .	70
<b>7. Zusammenfassung</b>	<b>73</b>
<b>8. Ausblick</b>	<b>74</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>76</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>78</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>79</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>82</b>

# Nomenklatur

## Liste der Formelzeichen

$\alpha$	Winkel zwischen dem Flächennormalvektor dem Sonnenvektor	$^{\circ}$
$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient	$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$
$\eta$	Wirkungsgrad	-
$\Psi$	längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient	$\text{W}/\text{m K}$
$\rho$	Dichte	$\text{kg}/\text{m}^3$
$A$	Fläche	$\text{m}^2$
$c$	spezifische Wärmekapazität	$\text{kJ}/\text{kg K}$
$c_0$	Konversionsfaktor des Kollektors	-
$c_1$	Wärmeverlustkoeffizient des Kollektors	$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$
$c_2$	quadratisches Glied des Kollektors	$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}^2$
$d\omega$	Inkrement des Raumwinkels	$^{\circ}$
$D$	Tageslichtquotient	-
$d$	Schichtdicke	$\text{m}$
$E$	Beleuchtungsstärke	$\text{lx}$
$f$	Besonnungsfaktor	-
$g$	Energiedurchlassgrad	%
$I$	Strahlung	$\text{W}/\text{m}^2$
$l$	Länge	$\text{m}$
$n$	Luftwechselrate	$\text{h}^{-1}$
$R$	Wärmeübergangswiderstand	$\text{m}^2 \text{K}/\text{W}$
$T$	Temperatur	$\text{K}$
$\bar{T}$	gemittelte Temperatur	$\text{K}$
$U$	Wärmedurchgangskoeffizient	$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$
$V$	Volumen	$\text{m}^3$

## Indizes

<i>abs</i>	Absorber
<i>fl</i>	flüssig
<i>amb</i>	ambient, außen
<i>beam</i>	Direktstrahlung
<i>cw</i>	Vorhangfassade
<i>dif</i>	Diffus
<i>eq</i>	äquivalent
<i>g</i>	Global
<i>gew</i>	gewichtet
<i>glas</i>	Glas
<i>i</i>	Bauteil i
<i>ins</i>	Insolation, Einstrahlung
<i>iso</i>	Isotrop
<i>j</i>	Bauteil j
<i>k</i>	Patch k
<i>opak</i>	lichtundurchlässig, opak
<i>raum</i>	Messraum
<i>se</i>	außen, extern
<i>si</i>	innen, intern
<i>sky</i>	Himmel

# 1. Einleitung

## 1.1. Hintergrund

Der Energieverbrauch in Österreich ist in den letzten Jahrzehnten konstant angestiegen. Verglichen mit dem Jahr 2000 (Endenergieverbrauch 943.651 TJ), erreichte 2008 die in Österreich gesamt aufgewendete Endenergie den Wert von 1.088.538 Terajoule ( $= 10^{12}$ ) [21]. Der Verbrauch im Gebäudesektor setzt sich im wesentlichen aus Raumheizung, Warmwasser, Klimaanlage, Beleuchtung und EDV zusammen. Die Statistik Austria [21] veröffentlicht in regelmäßigen Abständen die Aufschlüsselung des Endenergieverbrauches nach unterschiedlichen Sektoren. Abbildung 1.1 zeigt diese Verteilung der Endenergie für das Jahr 2008. Rund ein Drittel des österreichischen Endenergiebedarfs wird für den Gebäudesektor benötigt. Ein weiteres Drittel wird vom Verkehr verbraucht. Die restlichen Anteile teilen sich auf Dampferzeugung, Industrieöfen und Standmotoren auf, wobei die beiden letztgenannten zusammen dem Industriesektor zugeordnet werden können. Dies zeigt, dass Entwicklungen, die eine Energieeinsparung auf dem Gebäudesektor vorantreiben, von hohem Interesse sind.

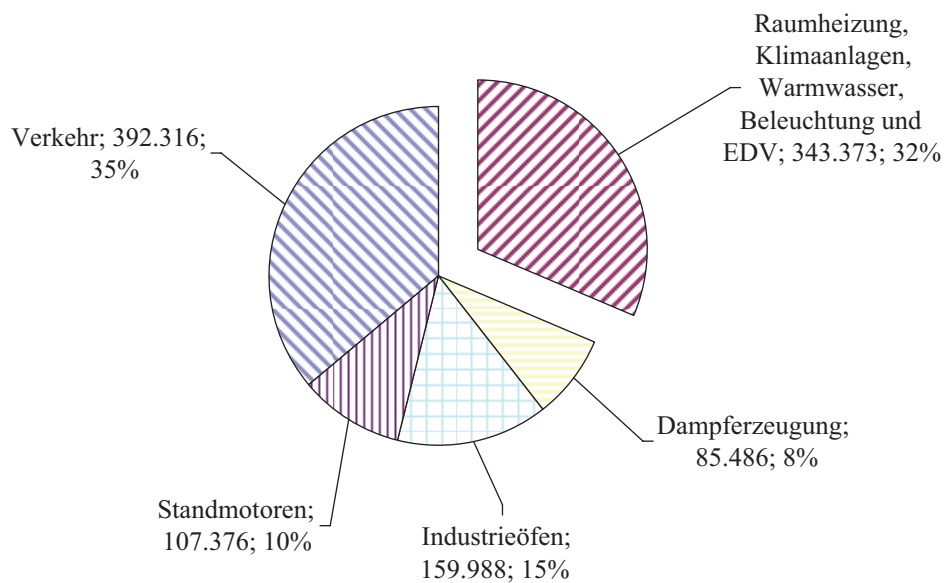


Abbildung 1.1.: Energetischer Endenergieverbrauch in Österreich im Jahr 2008 in Terajoule [21]

Betrachtet man die eingesetzten Ressourcen für die Bereitstellung an Endenergie, so zeigt sich, dass ein Großteil aus fossilen Quellen stammt. Endenergie ist jene Energiemenge, die dem Verbraucher für die Umsetzung in Nutzenergie zur Verfügung steht. In Abbildung 1.2 ist zu sehen, dass nur ca. 27% aus erneuerbaren Energiequellen stammen (ca. 66% der elektrischen Stromerzeugung sind aufgrund des hohen Wasserkraftanteils erneuerbar). Im Sinne einer nachhaltigen Energiepolitik gilt es diesen Anteil zu erhöhen. Österreich hat sich im Zuge der von der EU 2008 beschlossenen Klimapolitik (20-20-20 Ziele) verpflichtet, den Anteil an erneuerbarer Energie am Gesamtenergieverbrauch auf 34% zu erhöhen. [9]

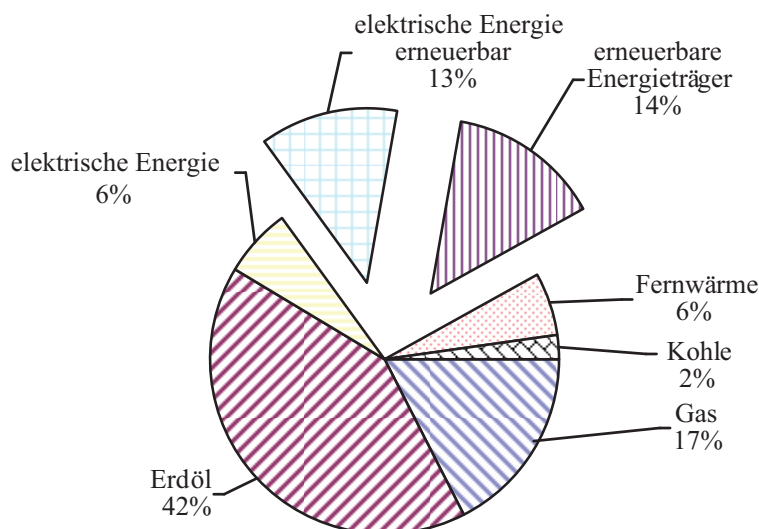


Abbildung 1.2.: Anteil der unterschiedlichen Ressourcen für die Bereitstellung des Endenergieverbrauchs in Österreich 2008 [21]

Im Zusammenhang mit dieser Arbeit ist im wesentlichen der Endenergieverbrauch im Gebäudesektor (Raumheizung, Warmwasser, etc.) von Interesse. Im Neubau wird der Endenergieeinsatz für diese Dienstleistungen aufgrund der gültigen Bauordnungen und dem am Markt verfügbaren Stand der Technik immer geringer. Ein großes Einsparungspotential stellt in dieser Hinsicht die Sanierung von Ein- und Mehrfamilienhäusern sowie dem großvolumigen Geschoßbau dar. Die derzeitige Sanierungsrate von 1% gilt es auf alle Fälle zu erhöhen ([16]). Im großvolumigen Geschoßbau wird oftmals die Außenhülle durch eine statisch tragende Primärkonstruktion mit offener Fassadenfläche realisiert. Diese offene Fläche wird dann in späterer Folge durch vorgehängte Fassadenelemente geschlossen. Diese Elemente, mit den dazugehörigen Funktionen Wärmeschutz, Schall-

schutz, etc. haben einen hohen Vorfertigungsgrad und ermöglichen so hohe Qualität und kurze Produktionszeiten.

### 1.2. Motivation

Das fünfjährige K-Projekt "Multifunktionelle Plug and Play Fassade"(MPPF) hat als Ziel, die vorgefertigten Fassadenelemente mit aktiven Komponenten zu versehen. Darunter versteht man einerseits Energie umwandelnde Technologien wie Solarthermie und Photovoltaik, andererseits gebäudetechnische Funktionen wie Wärme-, Kälte-, Lufteinbringung, Beleuchtung, Wasser-, Strom-, und IT-Versorgung. [25], [26], [18] Schlussendlich soll ein Konzept für ein neues Fassadenelement vorhanden sein, welches sich vom Status Quo wesentlich unterscheidet und einen wichtigen Schritt in Richtung idealer Fassade macht.

Durch aktive Elemente in der Fassadenfläche entstehen neue Energiequellen, welche es ermöglichen den Energiebedarf des Gebäudes (zum Teil) durch eigene Ressourcen zu decken. Dies stellt zusätzliche Anforderungen an die Haustechnik, da an Stelle der zentralen Verteilung der Energieströme, nun ein Konzept mit dezentraler Verteilung realisiert werden muss. Die Vision von sogenannten energieautarken Gebäuden mag auf den ersten Blick vielleicht zu ambitioniert klingen, ist jedoch Motivation genug, den Stand der Technik weiterzuentwickeln um dieses Ziel zu erreichen.

Auf diesem Weg müssen daher unterschiedliche Ideen zur Gestaltung der Fassade rasch einer quantitativen Bewertung unterzogen werden können. Dies ist mit Berechnungen und Simulationen oftmals ressourcenschonender zu bewerkstelligen als mit realen Versuchen. Zudem können mit virtuellen Darstellungen meist bessere Vergleiche zwischen Planungsvarianten durchgeführt werden. Daher spielt in diesem Projekt neben der Entwicklung eines realen, auch die Entwicklung eines virtuelle Prototypen eine wichtige Rolle.

Diese Diplomarbeit ist Teil des MPPF-Projektes und behandelt die Entwicklung eines ersten virtuellen Prototypen in Form der simulationstechnischen Abbildung des Büroraumes mit multifunktionaler Fassade.

### 1.3. Ziele dieser Arbeit

In dieser Diplomarbeit werden folgende Aufgabenstellungen behandelt.

- Randbedingungen für den Büroraum definieren. Dazu müssen alle relevanten Parameter gesammelt und aufgearbeitet werden. Dabei handelt es sich im wesentlichen um:
  - Wetterdaten



- Wandaufbauten
- Verglasung
- Geometrie
- Belegung
- Verschattung
- Luftwechsel
- Infiltration
- Fassadenkollektoren
- Photovoltaik
- Lüftungsgerät
- Erstellen eines Simulationsmodelles ohne MPPF-Module. Hierbei ergeben sich folgende Fragestellungen
  - Modellierung der Standardfassade in TRNSYS
  - Trennung zwischen Gebäude und Raum
- Erstellen eines ersten einfachen Simulationsmodells mit MPPF-Modulen
  - Fassadenkollektor als Wandaufbau abbilden
  - Photovoltaikmodul als Wandaufbau abbilden
  - Integration der elektrochromen Gläser in das Modell
  - Integration der semitransparenten Photovoltaik in das Modell
  - HLK-Gerät als Wandaufbau abbilden
  - Erstellen einer einfachen Anlagensimulation
- Verfeinerung der MPPF-Variante und erster Abgleich mit Messdaten
  - Detaillierte Betrachtung des Kollektormodells mit Hilfe einer thermischen Zone
  - Detaillierte Betrachtung des HLK-Gerätes mit Hilfe sechs thermischer Zone
  - Erster Vergleich zwischen Simulation und Messung

## 1.4. Vorgehensweise

Für die Aufgabenstellung wird TRNSYS 17 und das Plugin Google SketchUp als Simulationsumgebung verwendet. Dadurch ist es möglich, interne und externe 3D-Verschattung und 3D-Strahlungsverteilung in TRNSYS zu berücksichtigen. Bei der Gebäudesimulation wird jede Komponente als eigener Wandaufbau betrachtet, da sich die Temperaturverläufe in den Komponenten von jenen in normalen Wandaufbauten stark unterscheiden können (z.B. bei Stagnation des thermischen Kollektors). Die vereinfachte Anlagensimulation wird ebenfalls mit TRNSYS durchgeführt und liefert vom jeweiligen Anlagenzustand die Temperaturen in den Komponenten als Input für die Wandaufbauten.

Das Modell ist so aufgebaut, dass bei hohem Detaillierungsgrad die Komplexität der Simulation gering bleibt. Etwaige Änderungen im Prototyp (z.B. Änderung des thermischen Kollektors) können einfach im Simulationsmodell durchgeführt werden. Die gemessenen Wetterdaten am Standort westlich von Graz können für einen Vergleich zwischen Simulation und Messung herangezogen werden. Nach der Validierung und Anpassung des Modells ist es möglich den Einfluss der MPPF auf das Gebäude bei beliebigen Umgebungsbedingungen zu untersuchen.

## 2. Grundlagen

### 2.1. Thermische Gebäudesimulation

Die thermische Gebäudesimulation stellt ein wichtiges Instrument in der Planung und Untersuchung von thermischen Systemen dar. Ihre Anfänge liegen in den 1960er Jahren, mit dem Beginn von Rechner unterstützten Systemen. Konnten zu Beginn nur einfache Systeme berechnet werden, führte die rasante Entwicklung der Prozessor- und Speichertechnologie zu immer detaillierteren Simulationsmöglichkeiten. In den 80er Jahren etablierten sich die ersten Werkzeuge zur Lösung von partiellen Differentialgleichungen. (Ebenso die finite Differenzen Methode sowie die finite Elemente Methode etablierten sich zu dieser Zeit [12]). Clarke [2] definierte mehrere Generationen in der Entwicklung von Simulationsprogrammen. Generation 1 stellt die Ursprünge in der Simulationentwicklung dar. Die Programme waren Handbuch orientiert, behandelten nur Teilprobleme und waren einfach zu handhaben. Mit steigender Funktionalität der Programme nahm jedoch die Useability ab. Mit der Umstellung auf numerische Methoden (Programme der Generation 3) stiegen nicht nur die Möglichkeiten der Simulationstools, sondern auch die Anforderungen an den Nutzer. Heutige Programmpakete der Generation 4 bzw. 5 setzen eine Einschulung und lange Einarbeitungsphasen voraus.

Universitäten und Forschungseinrichtungen waren in der Entwicklung von Simulationsprogrammen maßgeblich beteiligt. So war es die University of Strathclyde (ESP-r), das Lawrence Berkeley National Laboratory (DOE-2, Energy Plus) sowie die University of Wisconsin-Madison (TRNSYS) die sich in den 90er Jahren mit Ihren Programmen am Markt etablierten. Die weiterhin schnelle Entwicklung im Bereich der Personal Computer führte dazu, dass es mittlerweile eine Vielzahl unterschiedlicher Simulationstools am Markt gibt. Das Institut für Wärmetechnik der TU Graz arbeitet unter anderem schon mehrere Jahre mit dem Programmpaket TRNSYS. Kurz vor Beginn dieser Arbeit ist die aktuelle TRNSYS Version 17 erschienen, welche für diese Arbeit verwendet wurde.

### 2.2. TRNSYS 17

#### 2.2.1. Aufbau

Für die thermische Simulation wird das Simulationspaket TRNSYS 17 [20] verwendet. Puschnig [17] beschreibt das Programmpaket TRNSYS folgendermaßen.

TRNSYS (*Transient System Simulation Program*) ist ein Programmpaket zur Berechnung des thermischen Verhaltens eines Gebäudes einschließlich der aktiven und passiven Komponenten zur Energieversorgung (z.B. Heizkessel, Wärmeverteilsystem, TWD, Kollektorsysteme) und zur Bilanzierung der auftretenden zeitabhängigen Energieströme. TRNSYS wurde ursprünglich für die detaillierte Analyse von Gebäuden mit aktiver Solartechnik entwickelt. Heute sind sowohl passive Solarkomponenten als auch herkömmliche Heiz- und Kühleinrichtungen als Modelle erhältlich. Der Vorteil von TRNSYS besteht in seiner Flexibilität und der Möglichkeit, ein System sehr detailliert nachzubilden.

Die Dissertation von Heimrath liefert ebenfalls eine sehr gute Programmbeschreibung. Ein klassisches Anwendungsgebiet von TRNSYS sind heutzutage dynamische, d.h. zeitbezogene Simulationen von Gebäuden, um ihr Verhalten in Abhängigkeit von klimatischen Schwankungen zu untersuchen. Dabei können verschiedene technische Gebäudekomponenten, beispielsweise Solaranlagen, eingebaut werden. Dieses Beispiel ist in der Abbildung 2.1 skizziert. Das Gesamtsystem Gebäude wird für die Simulation in die Teilbereiche allgemeine Gebäudedaten und spezielle technische Komponenten aufgeteilt, die durch jeweils eigenständige TRNSYS - Module beschrieben werden. Für die Umsetzung einer realen oder geplanten technischen Installation müssen die einzelnen Komponenten ermittelt und den entsprechenden TRNSYS - Modulen, den so genannten TYPES zugeordnet werden. [6]

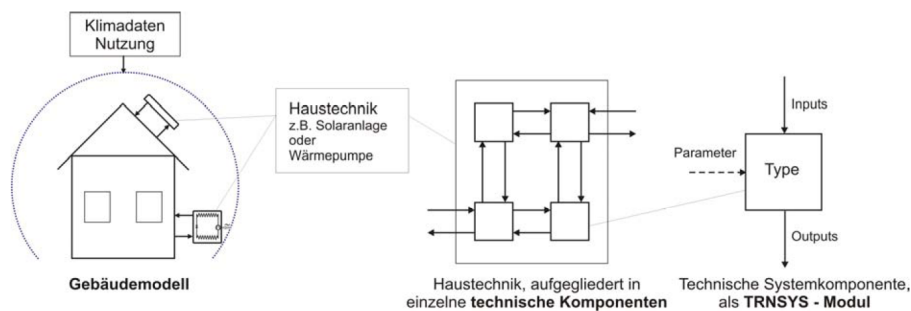


Abbildung 2.1.: Modularer Aufbau in TRNSYS [6]

Puschnig weiter: Jeder TYPE beschreibt die Funktionsweise einer bestimmten Systemkomponente. Das reale Betriebsverhalten der Komponenten wird in den TYPES mit mathematischen Algorithmen nachgebildet. Zur Lösung des Gleichungssystems, das sich aus den Einzelkomponenten und deren logischen Verknüpfungen im Gesamtsystem ergibt, stehen in TRNSYS verschiedene Lösungsverfahren zur Verfügung. Die Zeitschrittweite und die Genauigkeit, mit der simuliert wird, sind durch den Anwender wählbar. Prinzipiell können alle Eingangs- und Ausgangsgrößen jeder Komponente ausgegeben werden. Die Ausgabegrößen können zudem über definierte Zeitintervalle (Tage, Monate, Jahre) integriert werden.[17]



Die Darstellung des Gebäudes erfolgt in TRNSYS durch einen eigenen Type (Type 56). Um diesen mit Eingabedaten versorgen zu können wird ein eigenes Programm (TRN-Build) mitgeliefert. In der Version 17 gibt es eine Neuerung bei der Eingabe von Gebäudedaten. Es ist möglich, mit dem PlugIn Trnsys3d, Geometrieinformationen aus Google SketchUp zu übernehmen. Die Programmsoftware eignet sich sehr gut zum Erstellen einfacher dreidimensionaler Gebäudemodelle. Es zeichnet sich durch eine leicht zu erlernende Arbeitsweise aus und ist in der Standardversion kostenlos verfügbar. Durch das PlugIn werden zusätzlich Funktionen aktiviert. Um eine Raumzone in SketchUp zu zeichnen, muss diese vorher im Programm definiert werden. Anschließend wird mit den Standardwerkzeugen die Raumzone skizziert. Die Raumumschließungsflächen (Wände und Decken) werden im Programm als Flächen interpretiert. D.h. bei der Erstellung des Modells muss dies insbesondere bei dickem Mauerwerk berücksichtigt werden. Nimmt man die Außenmaße für die Modellbildung, ist die Innenraumfläche größer als im tatsächlichen Zustand. Bei der Verwendung von Rauminnenmaßen werden die Flächen der Wände und Decken etwas unterschätzt. Der Wandaufbau selbst wird erst nach dem Importieren in TRNBuild dem Modell zugewiesen. Fenster und transparente Oberflächen werden direkt in SketchUp in den entsprechenden Wandflächen gezeichnet. Die Verschattung von Nachbargebäuden oder ähnlichem kann durch sogenannte Shading Groups berücksichtigt werden. Diese müssen wie die Raumzonen eigens definiert und ihre Geometrie in SketchUp gezeichnet werden. SketchUp speichert alle Geometrieinformationen in Form von Vektoren in einem \*.idf-File ab.

Dieses Geometriemodell kann in TRNBuild importiert werden, wobei die Geometrieinformationen (Zonen, Flächen, Volumina) automatisch übernommen werden. Durch das Importieren wird das für die Simulation verwendete \*.b17-File erzeugt, welches mit TRNBuild oder einem Editor bearbeitet werden kann. Dieses File ist vergleichbar mit dem \*.bui-File (Building Input File) aus früheren TRNSYS Versionen. In TRNBuild werden wie bisher die technische Daten des Gebäudes eingegeben. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um den Wandaufbau, Fensterdaten, interne Lasten, Ventilation, Infiltration, Heizung und Kühlung. Zusätzlich kann man Informationen bezüglich der Gebäudesteuerung (Schaltzeiten von Kunstlicht, Regelung von Verschattungselementen) eingeben. Neben den Log Files werden bei Verwendung des 3D-Strahlungsmodells noch die Shading (\*.shm), Insolation (\*.ism) und View Faktor Matrix (\*.vfm) beim Speichern des TRNBuild-Files erstellt.

Die Shading Matrix dient zur Berechnung der verschatteten Direkt- und Diffusstrahlung auf externe Fenster. Dazu wird die Hemisphäre in 2305 Patches aufgeteilt (siehe Abbildung 2.3), wobei jeder Patch einem Punkt entspricht. Die Verschattung der direkten Strahlung wird über die Berechnung des Besonnungsfaktors  $f_{beam,k}$  für jedes Fenster und jeden Patch bewerkstelligt. Der Besonnungsfaktor ist in Formel 2.1 angeführt.

$$f_{beam,k} = \frac{\text{Sonnenlichtflaeche des Fensters}}{\text{Gesamtflaeche des Fensters}} \quad (2.1)$$

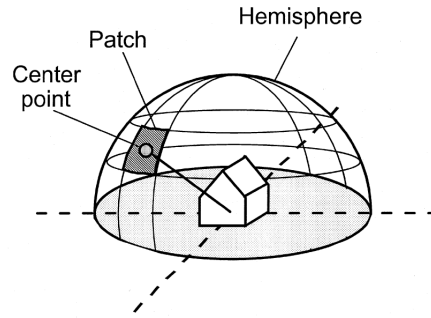


Abbildung 2.3.: Aufteilung der Hemisphäre in Patches [20]

Die externe Verschattung der Diffusstrahlung wird für jedes Fenster durch Bildung des Besonnungsfaktors für diffuse isotrope Himmelsstrahlung berücksichtigt (Siehe Formel 2.2).

$$f_{dif,sky,iso} = \frac{\sum_{k=1}^n \cos(\alpha_k) \cdot d\omega_k \cdot f_{beam,k}}{\sum_{k=1}^n \cos(\alpha_k) \cdot d\omega_k} \quad (2.2)$$

wobei  $\alpha_k$  der Winkel zwischen dem Flächennormalvektor und dem Sonnenvektor des Patches  $k$ ,  $n$  die Anzahl der Patches vor der Fläche,  $f_{beam,k}$  der Besonnungsfaktor bei Direktstrahlung des Patches  $k$  und  $d\omega_k$  das Inkrement des Raumwinkels von Patch  $k$  ist. Der Aufbau der Shading Matrix ist in Abbildung A.1 im Anhang zu finden.

Die Direktstrahlungsverteilung der einfallenden Solarstrahlung in der Raumzone wird durch die Insolation Matrix berechnet. Sie ist Analog aufgebaut wie die Verschattungsmatrix und berechnet die Verteilfaktoren für alle Flächen einer Zone je externes Fenster und jeden Patch. Es wird für jede Zone ein eigenes File erzeugt. Der Aufbau der Insolation Matrix ist in Abbildung A.2 im Anhang zu finden und wird nach Formel 2.3 berechnet.

$$f_{ins,k,n} = \frac{\text{Sonnenlichtflaeche des Fensters } k, \text{ die auf Oberflaeche } n \text{ faellt}}{\text{totale Sonnenlichtflaeche des Fensters } k} \quad (2.3)$$

Die Verteilung der Diffusstrahlung sowie der langwelligen Strahlung im inneren einer Raumzone wird mit Hilfe der View Faktor Matrix realisiert. Sie gibt an welcher Anteil der abgegebenen Strahlung von Fläche A auf Fläche B auftrifft und ist nur von der Raumgeometrie abhängig. (siehe Abbildung 2.4). Der Aufbau der View Faktor Matrix ist in Abbildung A.3 im Anhang zu finden.

Diese neuen Funktionen bedürfen natürlich gewisser Voraussetzungen. So ist es derzeit nur möglich, dass dreidimensionale Modell bei konvexer Zonengeometrie zu verwenden [20]. D.h. jeder Sehstrahl einer Fläche A auf eine Fläche B darf von der Geometrie nicht

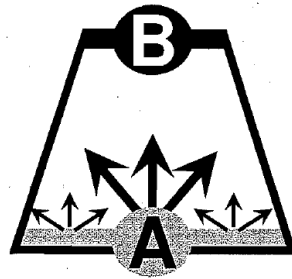


Abbildung 2.4.: Modell für die Erzeugung der View Faktor Matrix [20]

geschnitten werden (Siehe Abbildung 2.5). Weiters können keine Wärmebrücken zur Zone im 3D Modus angefügt werden.

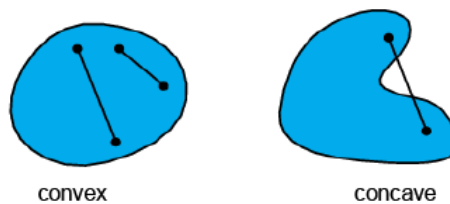


Abbildung 2.5.: Vergleich Convex-Concave [20]

Der Vorteil des neuen dreidimensionalen Raummodells liegt in der Berechnung der Strahlungsverteilung. Das detaillierte Strahlungsmodell kann für folgende 3 Strahlungsarten verwendet werden:

- Direktstrahlungsverteilung basierend auf Shading Matrix und Insolation Matrix
- Diffusstrahlungsverteilung Extern basierend auf Shading Matrix und Intern basierend auf View Factor Matrix
- Langwelliger Strahlungsaustausch zwischen allen Flächen einer Zone basierend auf View Factor Matrix

So ist es sehr einfach möglich, externe Verschattung von Nachbargebäuden oder ähnlichem zu realisieren. Gibt man die Geokoordinaten in das Programmpaket SketchUp ein, kann im Programm selbst mit der Funktion Schattenwurf eine erste Analyse über externe und Gebäudeeigenverschattung durchgeführt werden. Aufgrund der dreidimensionalen Geometrieinformationen, wird nun auch die einfallende Solarstrahlung durch transparente Flächen besser zugeordnet. Musste in früheren Versionen dies über die Eingabe von sogenannten GeoSurf-Faktoren bewerkstelligt werden, berechnet die neue Version dies aus den Geometrieinformationen. Weiters wird auch der langwellige Strahlungsaustausch im inneren der Zone mit Hilfe des neuen Gebäudemodells berücksichtigt.



Wie bereits erwähnt, basiert das thermische Modell der Wände auf der Response-Faktoren-Methode. Dabei wird die Wand als Black Box betrachtet. Zur Beschreibung der Wandoberflächentemperatur wird die "thermische Vergangenheit" der Wand definiert. Diese sagt aus, wie viele der vorhergegangenen Zeitschritte in die Berechnung des aktuellen Wertes berücksichtigt werden müssen. Muss die Temperatur z.B der letzten 10 Zeitschritte für die Berechnung der aktuellen Wandtemperatur berücksichtigt werden handelt es sich um eine (schwere) Wand mit hoher thermischer Masse. Die Temperatur einer Wand in Leichtbauweise kann hingegen mit der Information der letzten 4 Zeitschritte berechnet werden. Vorteil dieser Methode ist, dass die für die Berechnung der Wandtemperaturen notwendigen Koeffizienten vor dem eigentlichen Simulationsstart berechnet werden und konstant sind. Somit ist die Simulation schneller, da die Fouriersche Wärmeleitungsgleichung nicht mehr in jedem Zeitschritt gelöst werden muss. Nachteilig wirkt sich dieser Ansatz dadurch aus, dass die Information des Temperaturverlaufs in der Wand aufgrund des Black Box Modells verloren geht. Die Koeffizienten der Transferfunktionen der Wände (in Matrizenform) werden im \*.trn-File abgespeichert.

### 2.2.3. Simulationsmethodik

Im Simulation Studio werden die Daten der weiteren Types (ausgenommen von Type 56) definiert. Dabei handelt es sich meist um Types für das Einlesen der Wetterdaten und weiterer Komponenten (z.B. Wärmetauscher, Solarkollektoren, etc.). Diese werden anschließend miteinander verknüpft. Die Ergebnisse der Simulation werden gezielt durch das Aufrufen der gewünschten OUTPUTS in einem Ausgabe-TYPE erzeugt. Allgemeine Simulationseinstellungen (Startzeit, Stoppzeit, Zeitschrittweite, etc.) können ebenfalls im Studio geändert werden. Das Simulation Studio erzeugt das sogenannte Deck-File (\*.dck-File). Dieses File beinhaltet alle für die TRNSYS Simulation notwendigen Informationen. Wie bei allen Input und Output Dateien handelt es sich hier ebenfalls um eine simple Textdatei, die auch mit einem beliebigen Texteditor bearbeitet werden kann (für sehr komplexe Simulationen wird die Arbeit in den Textdateien, der Arbeit mit dem Simulation Studio oft vorgezogen).

### 2.2.4. Grenzen der dynamischen Simulation des thermischen Gebäudeverhaltens mit TRNSYS

2003 beschreibt Puschnig die Grenzen von TRNSYS wie folgt. [17] *TRNSYS verwendet zur Nachbildung des thermischen Gebäudeverhaltens ein Bilanzmodell mit einem Raumluftknoten pro Zone. Die Raumgeometrie ist nur durch die Größe der Flächen für den Wärmedurchgang und die Strahlungsverteilung zwischen den Flächen berücksichtigt. Die Aussagen über Raum- und Oberflächentemperaturen sind damit auf räumliche bzw. örtliche Mittelwerte beschränkt. Bei Betrachtung von Komfort und Raumklima in größeren Räumen spielen Luftströmungen eine bedeutende Rolle, z.B. bei Zugerscheinungen oder*

als Frischluftzug bei Luftheizungen. Die Behandlung solcher Phänomene erfordert eine dreidimensionale Auflösung der Strömungsvorgänge, die nur von CFD Programmen (Computed Fluid Dynamics) geleistet werden. Selbst diese speziellen Programme befinden sich zur Zeit für statische dreidimensionale Methoden noch im Validierungsstadium. Das Einknotenmodell von TRNSYS kann nur den Raumlufthechsel pro Zone berücksichtigen. Das Nutzerverhalten in Gebäuden kann einen Mehrverbrauch an Heizenergie von bis zu 100 % bedingen. Einer Gebäudelastsimulation ist immer ein festes Nutzerschema zugrundegelegt. Insbesondere die Beschreibung des Lüftungsverhaltens ist kritisch zu betrachten, da nur eine kontrollierte Lüftung beschrieben und berechnet werden kann. Freie Lüftung wird auch über eine feste Luftwechselrate in das Modell eingeführt. Dasselbe gilt für die Bedienung elektrischer Verbraucher und das Auftreten interner Wärmequellen. Aussagen können also nur bezüglich eines Standardnutzers gemacht werden. Eine Überprüfung bei angenommenem falschem Nutzerverhalten kann zum Vergleich herangezogen werden. Untersuchungen von Systemen mit sehr kleinen Zeitschritten sind unter TRNSYS nur eingeschränkt durchführbar. Das Gebäudemodell und die Numerik sind auf die schnelle Berechnung ganzer Jahresdurchläufe, in der Regel im Stundenzeitschritt, angepasst. Der Zeitschritt kann nur als konstant vorgegeben werden und führt bei Größenordnungen kleiner weniger Sekunden zu numerischen Instabilitäten. Die klimatischen Randbedingungen werden in der Regel aus Referenzwetterdaten gebildet, wie sie vom Deutschen Wetterdienst als "Testreferenzjahre" für bestimmte Regionen Deutschlands angeboten werden.

Anstatt der Testreferenzjahre können Programme (z.B. Meteonorm [14]) verwendet werden, die Wetterdaten für einen bestimmten Standort zu generieren. Diese Wetterdaten werden aus langjährigen Messungen unter Benutzung von speziellen Berechnungsalgorithmen berechnet.

In der aktuellen Version 17 von TRNSYS ist es erstmals möglich mehrere Luftknoten pro Zone zu definieren (siehe Abbildung 2.6). Für spezielle Lüftungsproblemstellung (z.B.

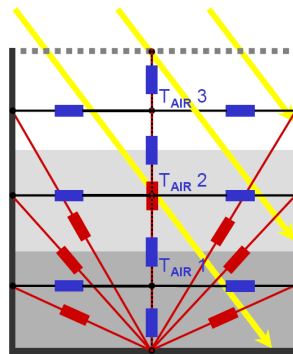


Abbildung 2.6.: Raumzone mit mehreren Luftknoten [20]

natürliche Lüftung) können auch Ansätze über Knotenmodelle verwendet werden. Ein typisches Beispiel dafür ist TRNFLOW. Hierbei handelt es sich um eine Integration von

COMIS in den Type 56 und es lassen sich damit auch dynamische Luftwechsel (abhängig von Wind, Windrichtung und Öffnungsgeometrien) mitsimulieren. Diese Möglichkeit wird in dieser Arbeit nicht verwendet und daher nicht näher erläutert.

### 2.2.5. Möglichkeiten der dynamischen Simulation des thermischen Gebäudeverhaltens mit TRNSYS

Puschnig beschreibt die Möglichkeiten von TRNSYS folgendermaßen. [17]

*Neben den üblichen Simulationsaufgaben, wie:*

- *Dynamische Heiz- und Kühllastermittlung für die thermischen Zonen.*
- *Winterliches und sommerliches Temperaturverhalten in den thermischen Zonen.*
- *Parameterstudien zu Wandaufbauten, Dämmstärken, Fensteranteilen, -qualitäten und -orientierungen.*
- *Auslegung solarer Brauchwasserbereitungssysteme.*

*bietet die Simulation mit TRNSYS den Einsatz folgender - heute oftmals unerlässlicher - Komponenten zur Erstellung eines Gebäude- und Anlagenkonzeptes an:*

- *Dynamische Betrachtung und Auslegung von Fußboden-, Wand- und Deckenregistern und -hypokausten zur Beheizung und/oder (Nacht-) Kühlung.*
- *Berücksichtigung des interzonalen Luftwechsels bei Galerien, Atrien und Wintergärten (passive Klimatisierung).*
- *Zonale Nachbildung (Zu- und Abluft) und Integration kontrollierter Wohnraumlüftungen zu deren Feinabstimmung.*
- *Dimensionierung von kontrollierten Wohnraumlüftungen mit WRG zur Luftheizung mit nachgeschalteter Luft/Luft-Wärmepumpe und vorgeschaltetem Erdwärmetauscher für Minimalenergiehäuser.*
- *Nachbildung und wirtschaftliche Dimensionierung von Erdwärmetauschern (zur Luft- und Wasservorwärmung und/oder -kühlung) z.B. im Hinblick auf ganzjährige Vermeidung von Vereisung an Luft/Luft-Wärmetauschern in Wechselwirkung mit dem Erdreich und dem Gebäude.*
- *Auslegung teilsolarer Raumheizungen mit Niedertemperaturflächenheizung - Wirtschaftliche Anlagengesamtdimensionierung bei angestrebten solaren Deckungsgrad.*
- *Luft- und Fensterkollektoren als Ein- oder Zweikreissysteme mit Steinspeichern und/oder Hypokausten.*
- *TWD - Anwendungen verschiedener Hersteller und Optimierung in Bezug auf die Fläche, Massivwand, die Verschattungsstrategie usw.*

- *Erstellen von Heizgeraden für luft- und wassergeführte Systeme als Funktion der Umgebungstemperatur, der Einstrahlung und der internen Gewinne. - Feinabstimmung verschiedenster Regelungsmechanismen.*
- *Nachbildung jeder Art und Regelung von Verschattungseinrichtung zur Vermeidung von sommerlicher Überhitzung.*

### 2.2.6. Einfluss der unterschiedlichen Strahlungsmodelle

Dieser Abschnitt untersucht den Einfluss der unterschiedlichen Strahlungsmodelle auf das Simulationsergebnis. Eine vereinfachte Gebäudegeometrie des Büroraumes (Abbildung 2.7) dient als Vergleichsmodell. Die Abweichung der Gebäudelängsachse beträgt wie im Realfall  $25^\circ$  zur Nord-Südausrichtung. Für die Wandaufbauten wurden ähnliche Konstruktionen gewählt wie sie am tatsächlichen Prototypen verbaut sind. Um das detaillierte Strahlungsmodell verwenden zu können, musste der Mauervorsprung an der Ostseite vernachlässigt werden. In Abbildung 2.7 ist zur besseren Verständlichkeit die Deckenfläche ausgeblendet. Der Einfachheit halber wurden interne Lasten und Venti-

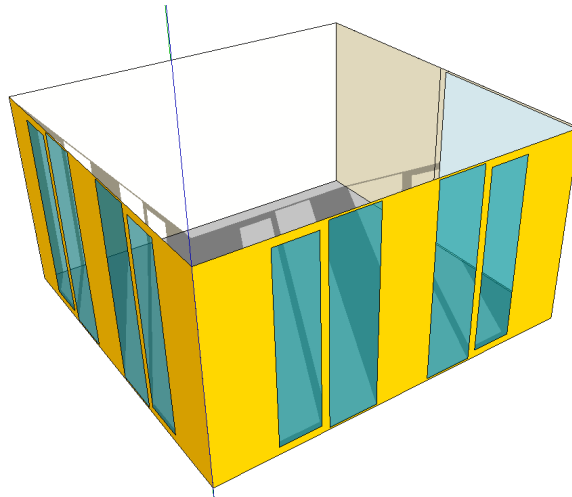


Abbildung 2.7.: Vereinfachte Raumgeometrie zur Untersuchung des neuen und alten Strahlungsmodells. Zur besseren Darstellung wurde die Decke ausgeblendet. Gut erkennbar ist der Schattenwurf. Hier sieht man, dass ein Großteil der zu diesem Zeitpunkt eintretenden Direktstrahlung auf dem Boden auftrifft.

lation nicht berücksichtigt. Ebenso wenig wurden Verschattungselemente für die Vergleichen definiert. Nur mit einem Infiltrationsluftwechsel von  $0,1 \text{ h}^{-1}$ , sowie maximaler Kühl- und Heizleistung (Kühlen auf  $26^\circ\text{C}$ , Heizen auf  $20^\circ\text{C}$ ) wird die Jahressimulation mit einem generierten Wetterdatensatz von Stallhofen durchgeführt. Um den Einfluss des Strahlungsmodells herauszufinden, wird für jede Fläche die absorbierte Direkt- und

## 2. Grundlagen

Diffusstrahlung ausgewertet. Bei Verwendung des bisherigen Strahlungsmodells wurden zusätzlich die GeoSurf-Faktoren angenommen. Die Verteilung der GeoSurf-Faktoren ist in Tabelle 2.1 zu sehen.

Tabelle 2.1.: Verteilung der Geosurf- Faktoren

Fläche	Nord	Ost	Süd	West	Decke	Boden
Geo-Surf Faktor	0,1	0,1	0,1	0,15	0	0,55

Der gesamte Raum absorbiert im Jahresverlauf 7307 kWh mit dem alten bzw. 7303 kWh mit dem neuen Strahlungsmodell. Die geringe Differenz kann für den Vergleich vernachlässigt werden. Betrachtet man die Verteilung der absorbierten Energie auf die jeweiligen Flächen, so ergibt sich ein größerer Unterschied. Dies zeigt Abbildung 2.8

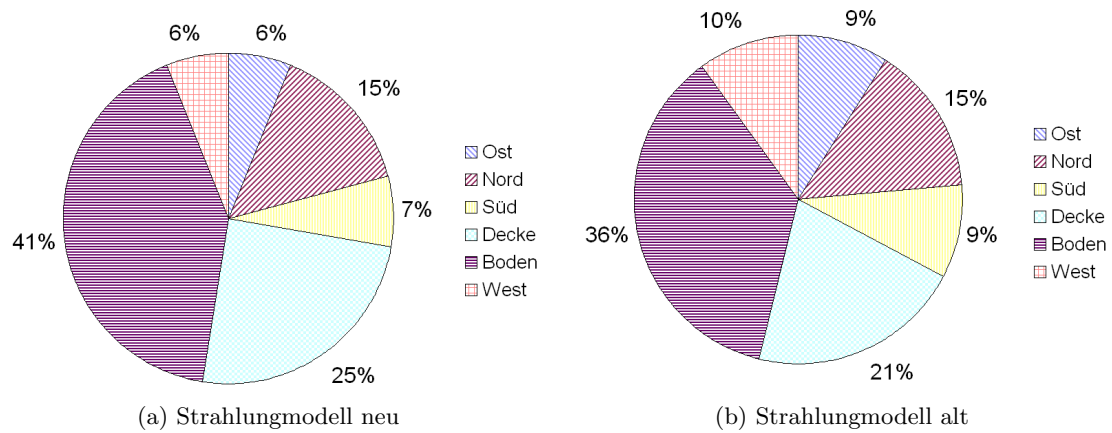


Abbildung 2.8.: Vergleich der absorbierten Strahlungsenergie bei neuem und altem Strahlungsmodell

Es ist zu erkennen, dass bei dem neuen Strahlungsmodell mehr Energie von der Bodenfläche absorbiert wird, als mit dem alten. Beim alten Modell ist die Absorption der Raumumschließungsflächen aufgrund der GeoSurf-Faktoren zu groß angenommen. Dies hat auch einen Einfluss auf den Jahresenergiebedarf für Heizen und Kühlen. Abbildung 2.9 zeigt, dass beim alten Modell geringfügig mehr Energie für Heizen und Kühlen aufgewendet werden muss.

Der Heizenergiebedarf nimmt mit dem neuen Strahlungsmodell in diesem Fall um ca. 2% von 3822 auf 3739 kWh bzw. der Kühlenergiebedarf um ca. 3% von 2095 auf 2037 kWh ab. Dies ist zwar ein geringer Einfluss, zeigt jedoch, dass die Wahl der GeoSurf-Faktoren mit Bedacht durchgeführt werden muss.

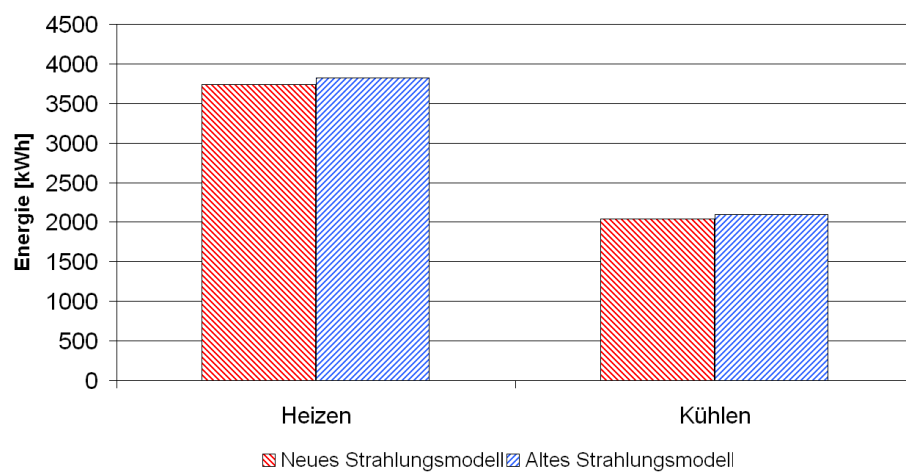


Abbildung 2.9.: Vergleich des Heiz- und Kühlenergiebedarf der beiden Strahlungsmodelle

### 3. Beschreibung und Modellierung des Fassadenprüfzentrums

Die *Hans Höllwart - Forschungszentrum für integrales Bauwesen AG* kurz FIBAG hat seinen Schwerpunkt auf Forschung und Entwicklung im Fassadenbau gelegt. Zu diesem Zweck wurde am Standort Stallhofen ein Forschungs- und Prüfzentrum errichtet. Derzeit wird an der Rückseite des Gebäudes ein Prüfstand zur Fassadenprüfung realisiert. Am Gebäude des Forschungszentrums wurde ein Teil der Fassade mit dem dahinterliegenden Büroraum für das Projekt MPPF zur Verfügung gestellt. An dieser Fassadenfläche wurden die folgenden Fassadentypen als Prototypen gebaut.

- Typ A: 2-schalige Abluft-Fassade
- Typ B: Aktiv- Multi- Klima- Fassade
- Typ C: Null- Energie- Heizfassade
- Typ D: Verbundfassade

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf dem Fassadentyp C, da dieser den zu untersuchenden Büroraum umschließt. Die Fassade besteht in der Standardausführung aus einer Pfosten- Riegel Konstruktion aus Aluminiumprofilen und erstreckt sich über das 1. und 2. Obergeschoß. Das Rastermaß ist 798 mm breit und die Hauptkonstruktion 3050 mm hoch. In diesem Bereich wechseln sich die drei verschiedenen Module Fixverglasung, bewegliche Verglasung (Fenster) und opakes Element ab. Im Bereich der Geschoßdecken sind zwischen der Pfosten-Riegel-Konstruktion nur opake Elemente verbaut. Diese dienen hauptsächlich der Wärmedämmung des Gebäudes. Abbildung 3.1 zeigt die Süd-Ost-Fassade samt einer Schnittdarstellung über das 1. und 2. Geschoß ohne multifunktionelle Komponenten. Die Schnittdarstellung verläuft im 2. Obergeschoß durch eine Fixverglasung und im 1. Obergeschoß durch ein Fenster. Die schraffierten Flächen in der Fassade kennzeichnen opake Elemente.

Ein Raumeschoß wird unterteilt in eine Zwischendecke (250 mm), dem Doppelboden (200 mm), der nutzbaren Raumhöhe (3000 mm) und einer abgehängten Decke (600 mm). Dies ergibt in Summe eine Geschoßhöhe von 4050 mm. Aus diesen Angaben wird ersichtlich, dass das Hauptelement der Fassade (3050 mm hoch) geringfügig höher als die nutzbare Raumhöhe ist (3000 mm). Der Abstand zwischen den Riegeln bezieht sich immer auf ihre Mittellinie. Nach Abzug der Breite der Aluminiumprofile (60 mm) entspricht die Höhe zwischen zwei Riegeln (2090 mm) annähernd der nutzbaren Raumhöhe.

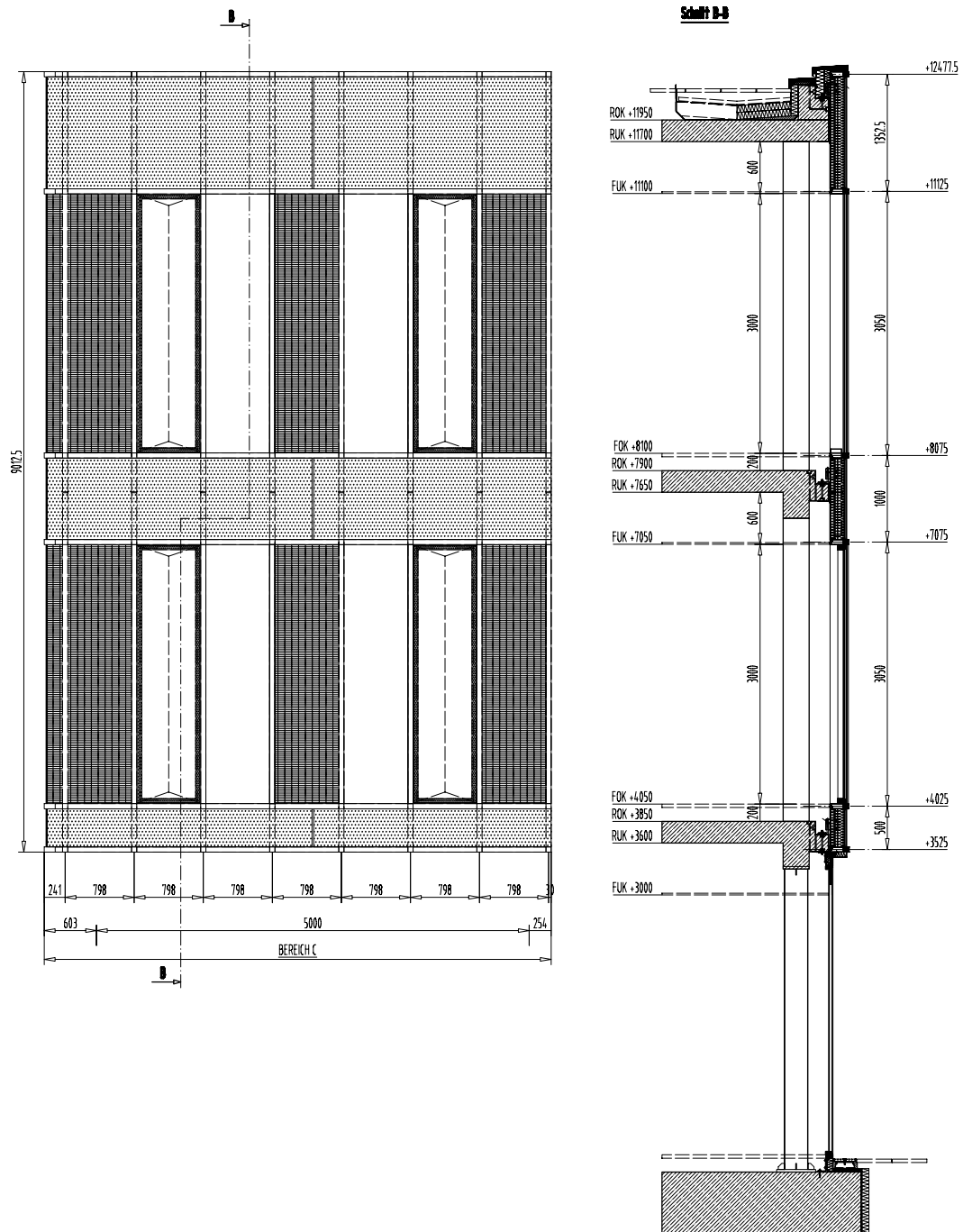


Abbildung 3.1.: Aufteilung der drei unterschiedlichen Elemente in der Süd-Ost-Fassade.  
Standardvariante ohne multifunktionelle Komponenten



### 3. Beschreibung und Modellierung des Fassadenprüfzentrums

Das Gebäude hat keine reine Nord-Südausrichtung sondern ist ca.  $25^\circ$  Richtung Süd-Ost gedreht. Abbildung 3.2a zeigt die Südansicht des Forschungszentrums mit den bereits integrierten multifunktionalen Elementen im 2. Obergeschoß. Die auf der Süd-Ost-Fassade eingebauten Elemente sind der Tabelle 3.1 zu entnehmen. Die grauen Sonnensegel auf der Westfassade wurden im Zuge eines anderen Projektes montiert und werden in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

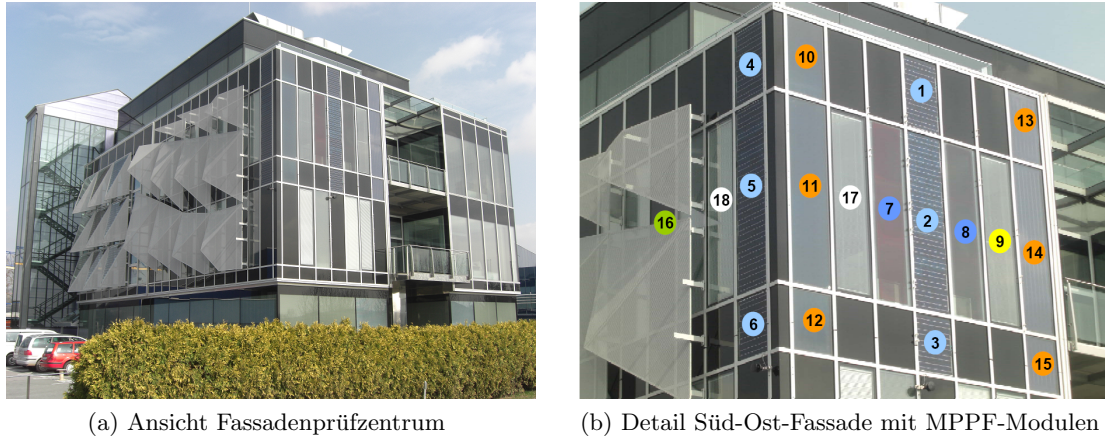


Abbildung 3.2.: Fotos des Fassadenprüfzentrums

Tabelle 3.1.: Aufteilung der MPPF-Module

Nummer	MPPF-Modul
1-6	Photovoltaik Module
7-8	in die Verglasung integrierte PV-Dünnschicht Zellen
9	Fenster
10-15	solarthermische Kollektoren
16	Dezentrales Fassadenlüftungsgerät
17-18	elektrochrome Verglasung

#### 3.1. Beschreibung des Büroraumes ohne multifunktionaler Komponenten

Im ersten Ansatz wird der Büroraum ohne multifunktionelle Komponenten modelliert, um in weiterer Folge einen Vergleich zwischen Standardfassade (Typ C) und MPPF durchführen zu können. Ein weiterer Grund für diesen Schritt ist die Beschaffung des Datenmaterials aller verwendeten Baustoffe.

Der Büroraum hat einen annähernd quadratischen Grundriss (Siehe Abbildung 3.3) und befindet sich im 2. Obergeschoß. Die Süd- und Westwände bestehen aus der Standard-



Tabelle 3.2.: Übersicht der verbauten Massen bezogen auf 1 m<sup>2</sup> Fassadenoberfläche (FOF) der Bestandsfassade [3]

Material	Form	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	Masse kg/m <sup>2</sup> - FOF	Anteil in Massen-%
Stahl verzinkt	Kleinteile	7850	5,21	11,3
nicht rostender Stahl	Schrauben, Muttern etc.	7850	2,24	
Aluminium	Stabförmig	2700	14,29	33,4
	Flächenförmig	2700	7,7	
Glas transparent	Flächenförmig und Bruch	2490	13,95	21,3
Steinwolle	Flächenförmig, Körperförmig	60	8,92	13,6
Emailglas	Flächenförmig und Bruch	2490	11,21	17,4
EPDM Dichtungen	Stabförmig	1200	0,92	1,4
Diverse Kunststoffe	Stabförmig	1200	0,48	0,7
Holz (Schalttafel)	Flächenförmig	500	0,62	1,0
Extrudiertes Polystyrol	Flächenförmig	40	0,04	0,1
Silikon (Schätzwert)			0,03	0,0
Summe			66,18	100

### 3.2. Modellierung des Büroraumes ohne multifunktionaler Komponenten

Für die Modellbildung wird vom Groben ins Feine vorgegangen. Zu Beginn werden sehr vereinfachende Annahmen getroffen, die im Zuge des Projektes immer detaillierter dargestellt werden. Im ersten Ansatz der Modellbildung wird der Büroraum als eine Zone betrachtet. Für die Abmessungen der Raumzone werden die Innenmaße bzw. wird die Raumnettofläche gewählt. Der aufgeständerte Boden und die abgehängte Decke sind hier bereits Teil des Wandaufbaus. Dies hat zur Folge, dass die Wärmedämmung hinter den opaken Elementen auf Höhe der Geschoßdecke nicht in TRNBuild abgebildet werden können, was zu einem schlechteren U-Wert der Fassade führt. Andererseits ist die der Umgebung ausgesetzte Fläche geringer. Im ersten Detaillierungsschritt wird ein 3-Zonen-Modell erstellt, wobei die abgehängte Decke und der Doppelboden jeweils eine eigene Zone darstellen. Der Büroraum wird in SketchUp gezeichnet und anschließend in TRNBuild importiert. In Abbildung 3.4 ist das Google SketchUp 3-Zonen-Modell zu sehen. Sehr gut ist die Unterteilung in 3 Raumzonen erkennbar. In dieser Modellvariante ist die gesamte Fassadenfläche als ein Wandaufbau aufgefasst. Die Fixverglasung und das Fenster werden ohne Rahmenanteil in TRNBuild modelliert. Der Rahmenanteil wird bereits zur Fassadenfläche dazu gezählt. Abbildung 3.5a zeigt die gesamte Südfassade des FIBAG-Gebäudes. Die hervorgehobene Fläche in Abbildung 3.5b wird zur Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Fassadenfläche verwendet.

Das Wärmetechnische Verhalten von Vorhangfassaden wird in der gleichnamigen Norm ÖNORM EN 13947 [23] beschrieben. Die darin beschriebenen Methoden berücksichti-

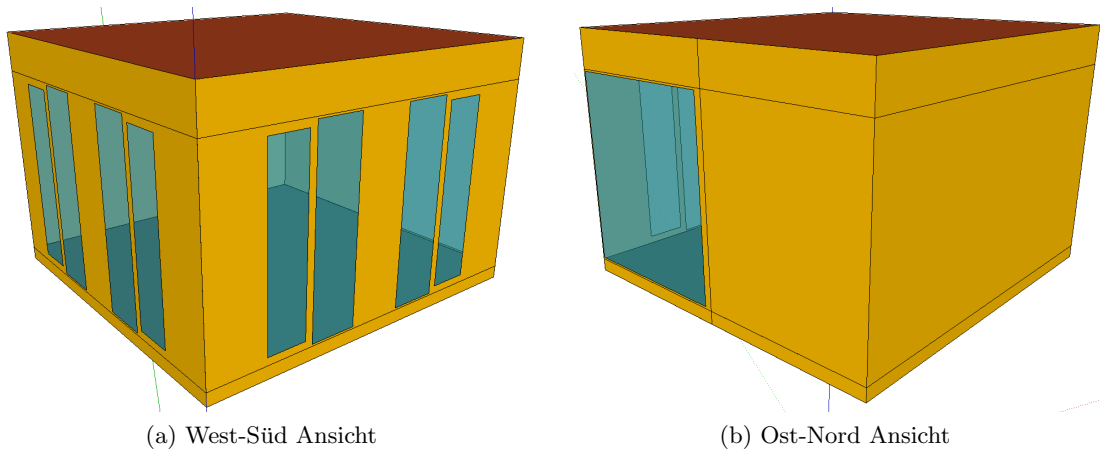


Abbildung 3.4.: Einfaches Google SketchUp 3-Zonen-Modell des Büroraumes

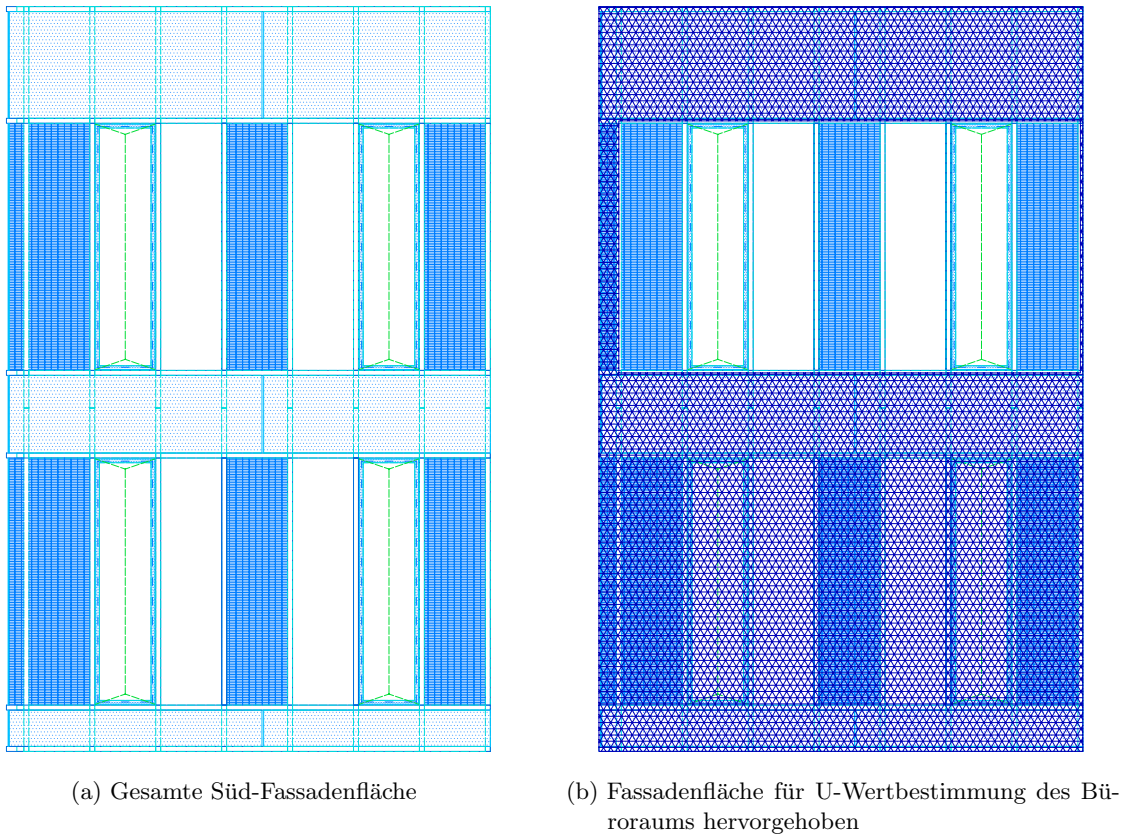


Abbildung 3.5.: Vergleich der Fassadenflächen

gen die unterschiedlichen Konstruktionen, verschiedene Materialien und die vorhandenen Wärmebrücken in den Fassaden. Für die Berechnung des gesamten Wärmedurchgangskoeffizienten der Fassade wird diese in mehrere Bereiche mittels Schnittebenen unterteilt und der Wärmedurchgangskoeffizient für jeden einzelnen Bereich berechnet. Anschließend wird aus diesen Werten der flächengewichtete Mittelwert gebildet. Die Unterteilung der Fassaden in Schnittebenen wird in der Norm wie folgt beschrieben:

*Die Unterteilung der Fassade ist in der Weise vorzunehmen, dass bedeutende Unterschiede zwischen den Berechnungsergebnissen für eine als Ganzes behandelte Fassade und dem Wärmestrom durch die unterteilte Fassade vermieden werden. Das geometrische Modell umfasst die zentralen Elemente (Verglasungen, Fensterbrüstungen usw.) und die Anschlüsse (Pfoften, Riegel, Silikonfugen usw.), die die verschiedenen zentralen Elemente miteinander verbinden. Eine geeignete Unterteilung in mehrere geometrische Bereiche wird durch die Wahl passender Schnittebenen erzielt. Die Schnittebenen sollten adiabatische Grenzen darstellen. Diese können entweder Symmetrieebenen oder Ebenen, in denen der Wärmestrom durch diese Ebene rechtwinklig zur Ebene der Vorhangfassade verlaufen, d.h. es sind keine Randeinflüsse vorhanden, sein [23]*

Zur Vereinfachung der Modellbildung ist die Bedingung der Symmetrieebenen wie in Abbildung 3.5b zu sehen, nicht eingehalten worden. Es ist ein Wärmestrom im Riegel zwischen Verglasung und opaken Elementen möglich. Für die Berechnung des gesamten Wärmedurchgangskoeffizienten der Fassade wird das Verfahren nach ÖNORM EN 13947 [23] mit Beurteilung der einzelnen Komponenten verwendet. Der Wärmedurchgangskoeffizient der gesamten Fassade wird als flächengewichteter Mittelwert aller Teilflächen und unter Berücksichtigung der längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten nach folgender Formel ermittelt.

$$U_{cw} = \frac{\sum_i A_i \cdot U_i + \sum_j l_j \cdot \Psi_j}{\sum_i A_i} \quad (3.1)$$

In diese Berechnung fließen die längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten infolge der kombinierten thermischen Wirkungen zwischen Verglasung, Paneel, Rahmen, Pfoften und Riegel ein. Der berechnete U-Wert für die in Abbildung 3.5b hervorgehobene Fassadenfläche beträgt 1,39 W/m<sup>2</sup> K. Im Vergleich dazu hat die gesamte Südfassade (Abbildung 3.5a) einen U-Wert von 1,35 W/m<sup>2</sup> K. Tabelle 3.3 zeigt die für die U-Wertberechnung von Abbildung 3.5b notwendigen Flächen und Koeffizienten [23] [5].

Der Einfluss der längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten kann in TRNBuild bei der Definition des Wandaufbaus nicht berücksichtigt werden. Daher wird der U-Wert vereinfachend zwischen Glasfläche und Fassadenfläche (opaker Fläche) flächengewichtet aufgeteilt. Mittels der Berechnungsvorschrift aus der Norm wird der U-Wert der gesamten Fassade berechnet. Anschließend wird der U-Wert ohne Glasflächen und deren

### 3. Beschreibung und Modellierung des Fassadenprüfzentrums

zugehörigen Wärmebrücken berechnet. Dieser beträgt  $1,28 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . Über die flächen-gewichtete Mittlung kann nun der äquivalente U-Wert der Glasfläche berechnet werden, um in Summe wieder den korrekten U-Wert der Fassade zu erhalten. Ausgehend von der Formel

$$U_{cw} = \frac{A_{opak} \cdot U_{opak} + A_{glas} \cdot U_{glas}}{A_{ges}} \quad (3.2)$$

folgt durch Umformung der Wärmedurchgangskoeffizient für die Glasfläche

$$U_{glas} = \frac{U_{cw} \cdot A_{cw} - A_{opak} \cdot U_{opak}}{A_{glas}} \quad (3.3)$$

mit dem Ergebnis  $U_{glas} = 1,52 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ .

Neben dem U-Wert werden in TRNBuild noch zwei weitere Materialkennwerte zur Berechnung der Transferfunktionen der Fassade benötigt. Das sind die spezifische Wärmekapazität und die Dichte der Fassade. Diese beiden Größen sind ein Maß für die Speicherfähigkeit des Bauteils. In TRNBuild werden Wandaufbauten nur durch unterschiedliche Schichtdicken der Materialien definiert. D.h. die Form der verbauten Materialien muss vollflächig sein, was jedoch bei dieser Fassadenkonstruktion nicht gegeben ist. Daher wird ein äquivalentes Fassadenmaterial, welches nur aus einer Schichtdicke besteht, eingeführt. Dies wird erreicht, wenn die Dichte der verbauten Materialien mit den Masseanteilen gewichtet wird. Die Summe dieser gewichteten Dichten ergibt die Gesamtdichte des äquivalenten Fassadenmaterials. Als Datengrundlage dient Tabelle 3.2, wo alle verbauten Materialien auf einen Quadratmeter Fassadenoberfläche bezogen sind. Für die äquivalente Fassade wird diese Tabelle auf die Hauptbestandteile vereinfacht. Dies ist in Tabelle 3.4 zu sehen, wo zusätzlich die spezifischen Wärmekapazitäten bzw. die gewichteten spezifischen Wärmekapazitäten angeführt sind.

Tabelle 3.3.: U-Wertberechnung des Fassadenausschnittes [23], [5]

Elemente	$A$ $\text{m}^2$	$U$ $\text{W/m}^2 \text{ K}$	$l$ $\text{m}$	$\Psi$ $\text{W/m K}$	$A \cdot U$ $\text{W/K}$	$l \cdot \Psi$ $\text{W/K}$
Pfosten	1,28	1,42			1,82	
Riegel	0,31	1,42			0,44	
Fensterrahmen	0,82	2,76			2,27	
Pfosten-Rahmen			11,96	0,07		0,84
Riegel-Rahmen			2,95	0,07		0,21
Verglasung Fenster	3,59	1,10	14,00	0,11	3,95	1,54
Verglasung Fix	4,41	1,10	14,91	0,12	4,85	1,79
Opakes Paneel	6,62	0,23	22,37	0,20	1,52	4,47
Summe	17,04				14,86	8,85

### 3. Beschreibung und Modellierung des Fassadenprüfzentrums

---

Laut diesen Daten hat ein Quadratmeter Fassadenoberfläche ein Gewicht von 63,52 kg. Die Berechnung der äquivalenten Schichtdicke ist in Formel 3.4 ersichtlich.

$$m = \rho_{gew} \cdot V = \rho_{gew} \cdot A \cdot d_{eq} \implies d_{eq} = \frac{m}{A \cdot \rho_{gew}} \quad (3.4)$$

Das äquivalente Fassadenmaterial hat eine Dicke von 2,2 cm, eine Dichte von 2926 kg/m<sup>3</sup> und eine spezifische Wärmekapazität von 0,816 kJ/kg K. Der fehlende Kennwert für die interne Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten in TRNBuild ist die äquivalente Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ . Diese berechnet sich aus der Formel für den Wärmedurchgangskoeffizienten. Sie lautet:

$$U = \frac{1}{R_{se} + \sum_{i=1}^n \frac{d_n}{\lambda_n} + R_{si}} \quad (3.5)$$

Nach Umformung ergibt sich die Gleichung für  $\lambda_{eq}$  zu:

$$\lambda_{eq} = \frac{U_{opak} \cdot d_{eq}}{1 - U_{opak} \cdot (R_{se} + R_{si})} \quad (3.6)$$

Die äquivalente Fassade hat eine Wärmeleitfähigkeit von 0,036 W/m K.

Mit diesen Daten kann nun in TRNBuild die Fassade abgebildet werden. Die weiteren Umschließungsflächen werden anhand des Datenmaterials als eigene Wandaufbauten definiert. Die unterschiedlichen Wandaufbauten sind in Tabelle 3.5 angeführt. Die U-Werte berechnen sich nach Formel 3.5 mit den Wärmeübergangswiderständen  $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2 \text{ K/W}$  für externe und  $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \text{ K/W}$  für interne Bauteilschichten. Die Innenwände werden vereinfacht aus einer Kombination aus Holz und Stoffschichten modelliert. Alle Flächen die nicht an die Umgebung grenzen werden als interne Flächen mit adiabater Randbedingung modelliert. Daher hat der U-Wert der Innenwände

Tabelle 3.4.: Materialzusammensetzung der äquivalenten Fassade

Material	Masse kg/m <sup>2</sup> - FOF	Anteil in Massen-%	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$\rho_{gew}$ kg/m <sup>3</sup>	$c$ kJ/kg K	$c_{gew}$ kJ/kg K
Stahl	7,45	12	7850	921	0,48	0,056
Aluminium	21,99	34	2700	935	0,92	0,318
Glas	25,16	40	2490	986	0,75	0,297
Steinwolle	8,92	14	60	84	1,03	0,144
Summe	63,52	100		2926		0.816

Tabelle 3.5.: Wandaufbauten des 3-Zonen-Modells in Standardausführung

Wand	Bauteilschicht	$d$ m	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$\lambda$ W/m K	$c$ kJ/kg K	$U$ W/m <sup>2</sup> K
Fassade	äquivalente Fassade	0,022	2926	0,039	1,03	1,28
Doppelboden	Doppelboden	0,04	800	0,180	1,07	2,07
abgehängte Decke	abgehängte Decke	0,02	900	0,210	1,05	2,82
Außen Decke	Stahlbeton	0,25	2400	2,500	1,08	0,204
	Steinwolle	0,16	60	0,036	1,03	
	Kiesschüttung	0,10	1800	0,700	1,00	
	Waschbetonplatte	0,04	2200	1,300	1,08	
Geschoßdecke	Stahlbeton	0,25	2400	2,500	1,08	2,78
Innenwand Holzstoff	Stoffplatte	0,007	920	0,500	1,80	1,52
	Spanplatte	0,012	500	0,100	2,50	
	Luftschicht	0,062				
	Spanplatte	0,012	500	0,100	2,50	
	Stoffplatte	0,007	920	0,500	1,80	

nur informativen Charakter, da es aufgrund der adiabatischen Randbedingung keinen Wärmestrom über diese Flächen gibt.

Eine weitere wichtige Rolle spielt die Speicherfähigkeit des Raumes (Kapazität). Dazu zählt unter anderem das Mobiliar und die Kapazität des Raumluftvolumens sowie in diesem Fall die Säulen aus Stahlbeton im Büroraum. Sie wird ermittelt indem man die spezifische Kapazität der Materialien und Stoffe im Raum mit ihrem Gewicht multipliziert (Formel 3.7).

$$C = \sum_i c_i \cdot m_i \quad (3.7)$$

In folgender Tabelle 3.6 ist eine einfache Aufstellung zur Ermittlung der Raumkapazität zu sehen. Die überschlagsmäßige Berechnung ergibt einen Wert von 2640 kJ/K. Für die

Tabelle 3.6.: Berechnung der Raumkapazität

Material	$V$ m <sup>3</sup>	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$m$ kg	$c$ kJ/kg K	$C$ kJ/K
Luftvolumen	93	1,204	112	1,012	115
Stahlbeton	0,743	2300	1707	1,08	1845
Möbelholz			200	2,5	500
50 Stück Ordner			135	1,34	180
Summe					2640

Simulation wird die Raumkapazität noch etwas höher geschätzt und mit 3000 kJ/K angenommen. Dies führt dazu dass, starke Temperaturschwankungen im Raum etwas gedämpft werden.



Da für die anschließende Simulation das neue dreidimensionale Strahlungsmodell verwendet wird, kann die Gebäudeeigenverschattung ebenfalls berücksichtigt werden. Für diesen Fall muss in Google SketchUp die restliche Gebäudehülle des FIBAG-Gebäudes eingegeben werden. Durch Definition einer sogenannten "Shading Group" ist dies sehr einfach zu realisieren. Abbildung 3.6 zeigt die Shading Group im SketchUp Modell. Es ist zu sehen, dass die Gebäudeeigenverschattung nur auf der Ostseite (siehe Abbildung 3.6b) eine Rolle spielt. Weiters ist hier gut erkennbar, welche Flächen an die Umgebung angrenzen und welche Flächen als interne Flächen behandelt werden.

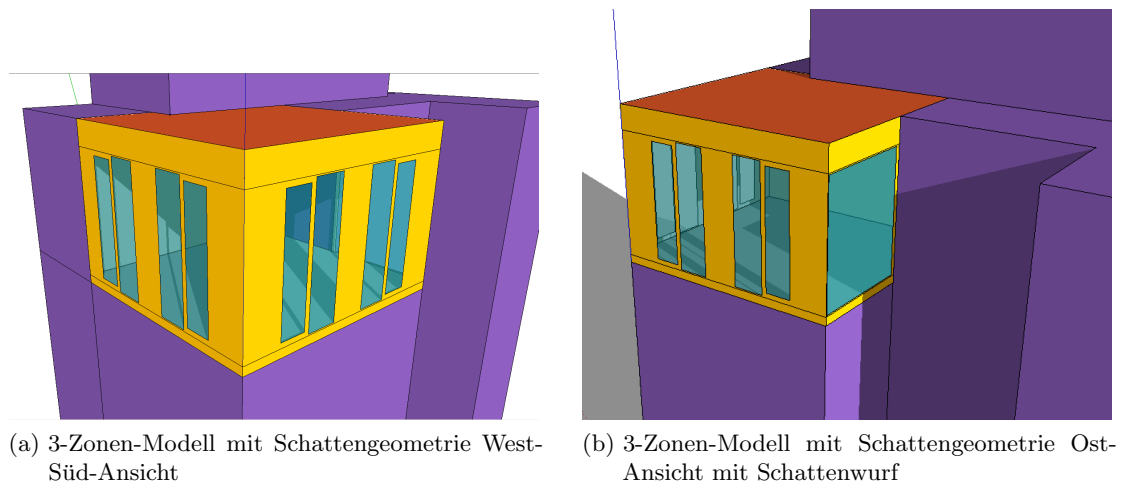


Abbildung 3.6.: Gebäudeeigenverschattung

Diese Gebäudegeometrie mit den anschließenden Nutzungsrandbedingungen stellt die grundlegende Simulationsvariante ohne MPPF-Module dar.

### 3.3. Nutzungsrandbedingungen

Im folgenden Abschnitt werden die Nutzungsrandbedingungen für den Büroraum definiert. Von Seiten der FIBAG wurde die Haustechnikberechnung (Norm Heizlast nach ÖN EN 12831 und Kühllast nach VDI 2078) zur Verfügung gestellt und anhand dieser Daten die Randbedingungen definiert. Laut diesen Unterlagen hat der Büroraum eine Norm-Heizlast von 2700 W und eine Kühlleistung von 3400 W. Der Büroraum ist für 3 Personen mit Computerarbeitsplatz konzipiert. Die Nutzungszeit beginnt Wochentags um 08:00 Uhr, unterbrochen von einer Stunde Mittagspause von 12:00-13:00 Uhr und endet um 17.00 Uhr abends. Die Anlagentechnik hat eine Betriebszeit von Wochentags 06:00 bis 22:00 Uhr und Samstags von 10:00-14:00 Uhr. Damit soll gewährleistet werden, dass der Büroraum am morgen vorkonditioniert ist. Außerhalb der Betriebsdauer für die Anlagentechnik, wird die Lüftung deaktiviert bzw. die Heizung abgesenkt (Die Kühlung wird unabhängig von der Betriebszeit gesteuert). Der Wärmeeintrag pro Person

beträgt gemäß VDI 2078 [28] 120 W pro Person. Für eine Computerarbeitsplatz wird ein Wärmeeintrag von je 140 W angesetzt. Dieser Wert entspricht annähernd dem Wert einer Messung aus dem Projekt COOLSAN [1]. Die Konditionierung des Büroraumes erfolgt während der Heizperiode auf 21°C in der Anlagenbetriebszeit und wird auf 17°C außerhalb der Anlagenbetriebszeit abgesenkt. Die Zulufttemperatur der Lüftung wird durch einen Fühler im Kühlbetrieb (Sommer) auf 18°C, bei Heizbetrieb im Winter auf 23°C und in der Übergangszeit auf 21°C geregelt. Die Kühlung wird bei einer Raumlufttemperatur von > 26°C aktiviert. Der Infiltrationsluftwechsel wird gemäß dem Neubaustandard mit 0,1 h<sup>-1</sup> angesetzt. Während der Betriebszeit beträgt der Luftwechsel 1,3 h<sup>-1</sup> mit den oben angeführten Einblasetemperaturen. Dies entspricht dem Luftwechsel eines dezentralen Lüftungsgerätes, welches in weiterer Folge in der MPPF Fassade eingesetzt wird. Die künstliche Beleuchtung verursacht im Falle ihrer Aktivierung einen Wärmeeintrag von 19 W/m<sup>2</sup>. Die Steuerung erfolgt tageslichtabhängig um eine Beleuchtungsstärke von 500 lx im Raum zu gewährleisten. Die Beleuchtungsstärke im Raum wird über einen mittleren Tageslichtquotienten bestimmt. Der Tageslichtquotient ist das Verhältnis der Beleuchtungsstärke eines Punktes im Raum (dem Arbeitsplatz) zur Beleuchtungsstärke einer waagerechten Flächen im Freien bei bedecktem Himmel (ohne Verbauung) [4].

$$D = \frac{E_{raum}}{E_{amb}} \quad (3.8)$$

Da die Positionierung der Arbeitsplätze im Raum nicht bekannt ist, wird anstatt einer detaillierten Berechnung des Tageslichtquotienten durch eine Lichtsimulationsprogramm eine Näherungswert von 2% gewählt. D.h., dass 2% der Beleuchtungsstärke außerhalb des Gebäudes auf eine horizontale Fläche zur Steuerung des Kunstlichts herangezogen werden. Der Zusammenhang zwischen Globalstrahlung auf eine horizontale Fläche und der Beleuchtungsstärke wird wiederum durch einen Näherungsfaktor [27] definiert und ist in Formel 3.9 angeführt.

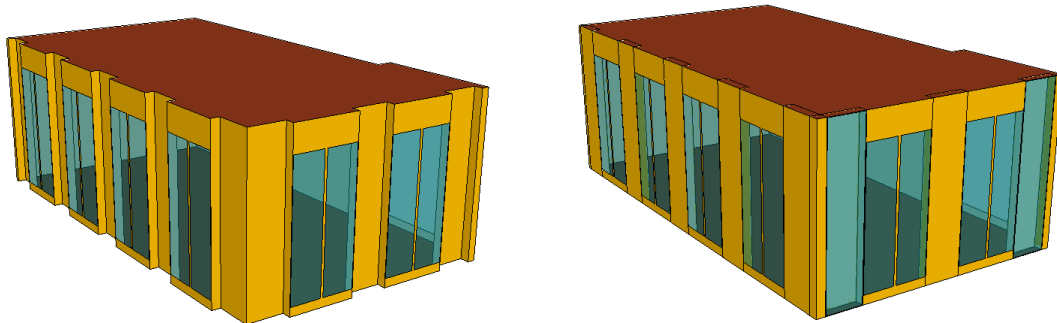
$$E_{amb} = 125 \cdot I_g \quad (3.9)$$

Mit diesen Zusammenhängen kann nun eine tageslichtabhängige Steuerung in TRNSYS definiert werden. Das Kunstlicht wird eingeschaltet sobald die Beleuchtungsstärke im Raum unter 500 lx fällt. Über 700 lx wird das Kunstlicht wieder abgeschaltet. Eine Kopplung zwischen Kunstlicht und Verschattung wird nicht berücksichtigt. Es wird angenommen, dass bei aktivem Sonnenschutz noch ausreichend Tageslicht in den Raum eindringt [19]. Die Steuerung der Verschattungseinrichtung erfolgt in Abhängigkeit der Strahlung auf die jeweilige Fassadenfläche. Ab einer Globalstrahlung > 300 W/m<sup>2</sup> wird die Verschattung aktiviert und unterhalb von 200 W/m<sup>2</sup> wieder geöffnet [19]. Die Verschattungselemente auf der Süd- und Westfassade sind innenliegend. Die Verschattung auf der Ostseite ist in eine 3-Scheibenverglasung zwischen Außen- und Mittelscheibe

integriert. Sie wird in der Modellbildung als innen liegende Verschattung berücksichtigt. Eine aktivierte innenliegende Verschattung hat einen Transmissionsgrad von 20% und einen Absorptionsgrad von 50%. Die für die Simulation mit TRNSYS notwendigen Randbedingungen sind nochmals in Tabelle 3.7 aufgelistet. Diese Auflistung bildet die Basisvariante für die einfache Gebäudesimulation ohne multifunktionelle Komponenten.

## 3.4. Fassadenintegrierte Komponenten

Als erster Ansatz zur Modellierung des Büroraumes mit MPPF-Modulen, wird im realen Fall ein Plug & Play Konzept erarbeitet. Der Gedanke dahinter ist, dass alle opaken Module (Solarthermie, Photovoltaik, dezentrales Lüftungsgerät und das bestehende Dämmmodul) für sich in Google SketchUp aufgebaut werden. Dazu muss man zu Beginn einmal die Modulgeometrie zeichnen und anschließend für jedes Element den speziellen Wandaufbauten definieren. Ziel ist es eine eigene Modulbibliothek mit jeweils unterschiedlichen Modulen zu erstellen. Anschließend wird der Büroraum ebenfalls in SketchUp modelliert, wobei die Flächen für die opaken Elemente frei gelassen werden. Da die Verglasungselemente grundsätzlich fix vorgegeben sind, werden sie mit dem Büroraum mitmodelliert. Der letzte Schritt ist das Einbauen der unterschiedlichen Module aus der Bibliothek in das Modell (sozusagen Plug & Play). Nach dem Einbau muss nur mehr die gegenseitige Zuweisung der Flächen erfolgen bevor das Modell in TRNbuild importiert werden kann. Abbildung 3.7 zeigt wie die Grundstruktur des Büroraumes mit den Modulen verknüpft wird. Vorteil dieser Variante ist, dass man sehr schnell unterschiedliche Modulanordnungen untersuchen kann.



(a) Grundstruktur ohne Module

(b) Komplette Fassade mit Modulen

Abbildung 3.7.: Erste Idee der Modellbildung

Leider kann diese Idee der Modellbildung nicht zufriedenstellend gelöst werden. Dies liegt unter anderem daran, dass die Grundgeometrie des Büroraumes nicht mehr konvex ist (Siehe Kapitel 2.2.2). Weiters ist die Bildung einer Modulbibliothek in Google SketchUp alles andere als einfach. Wird beispielsweise ein Modul durch Copy & Paste zweimal

Tabelle 3.7.: Nutzungsrandbedingung für die Gebäudesimulation

Allgemeine Randbedingungen	
Nutzungsprofil	Gruppenbüro
Personenanzahl	3
Nutzungszeit Mo - Fr	8:00 Uhr bis 12:00 Uhr und 13:00 bis 17:00 Uhr
Betriebszeit Anlagentechnik Mo - Fr	6:00 Uhr bis 22:00 Uhr
Betriebszeit Anlagentechnik Sa	10:00 Uhr bis 14:00 Uhr
Heizung	
Maximale Heizleistung lt. Haustechnikberechnung	2,7 kW
Betriebszeit Heizung	1. Oktober - 1. Mai
Sollraumtemperatur Betriebszeit Anlagentechnik	21°C
Sollraumtemperatur außerhalb Betriebszeit	17°C
Kühlung	
Maximale Kühlleistung lt. Haustechnikberechnung	3,4 kW
Aktivierung Kühlung	$T_{raum} > 26^{\circ}\text{C}$
Betriebszeit Kühlung	Anfang Mai - Ende September
Interne Wärmequellen	
Personen	120 W
EDV Arbeitsplatz	140 W
Beleuchtung	19 W/m <sup>2</sup> (50% konvektiv)
Lüftung	
Infiltrationsluftwechsel	0,1 h <sup>-1</sup>
Luftwechsel Betriebszeit Anlagentechnik	1,3 h <sup>-1</sup>
Winterbetrieb	1. November bis 1. März
Einblasetemperatur Winterbetrieb	23°C
Übergangsbetrieb	1. März bis 1. Juni, 1. September bis 1. November
Einblasetemperatur Übergangsbetrieb	21°C
Sommerbetrieb	1. Juni bis 1. September
Einblasetemperatur Sommerbetrieb	18°C
Sonnenschutz	
Verschattungsart Ost	innenliegend (20% Transmission, 50% Absorption)
Verschattungsart Süd	innenliegend (20% Transmission, 50% Absorption)
Verschattungsart West	innenliegend (20% Transmission, 50% Absorption)
Schließen	Gesamtstrahlung auf Fassade > 300 W/m <sup>2</sup>
Öffnen	Gesamtstrahlung auf Fassade < 200 W/m <sup>2</sup>
Beleuchtungssteuerung	
Steuerungsart	Tageslichtabhängig
Einschaltschwelle	500 lx
Ausschaltschwelle	700 lx
Kopplung mit Sonnenschutz	keine

in SketchUp eingefügt so müssen für das neu eingefügte Modul die Randbedingungen der Flächen neu definiert werden. Weiters bereitet es Probleme, Zonen mit Fensterflächen zu kopieren. Derzeit muss nach jedem dieser Vorgänge das \*.idf-File kontrolliert, bzw. das Modell in TRNBuild importiert werden und auf etwaige Fehler untersucht werden. Generell ist zu sagen, dass die Bedienung von SketchUp derzeit nicht sehr nutzerfreundlich ist und auf jeden Fall noch verbessert werden muss. Ein drittes Problem bei der Modellbildung ist die Kontaktstelle zwischen der Pfosten-Riegel-Konstruktion und dem Modulen. Die Kontaktstelle stellt auch eine Wärmebrücke dar, kann jedoch bei Verwendung des dreidimensionalen Gebäudemodells in TRNBuild nicht eingegeben werden. Dies wird kompensiert, indem die Verschlechterung des U-Wertes aufgrund der Wärmebrücke auf die Außenfläche des Bauteils zurückgerechnet wird.

Aus diesen Gründen wird der erste Ansatz der Plug & Play Modellierung verworfen. Das opake Photovoltaikmodul wird nur mehr als Wandaufbau und nicht mehr als Zone betrachtet. Das solarthermische Modul wird wie ursprünglich geplant als Einzonen-, das HLK-Modul als Mehrzonenmodell aufgebaut. Da keine Modulbibliothek im Hintergrund aufgebaut wurde, muss nun jedes Modul neu aufgebaut werden. Der Büroraum wird einem konkaven Grundriss unterworfen. D.h. es wird an der Ostseite der Vorsprung der Außenhülle vernachlässigt. Weiters wird die Fassadenfläche eben modelliert und die thermischen Zonen (HLK-Module und Solarthermie) außen angefügt. Dies hat zur Folge, dass diese Zonen eine Gebäudeeigenverschattung bewirken, wenn sie mit ihrer tatsächlichen Wandstärke gezeichnet werden. Um dies zu verhindern wird die Geometrie dahingehen verändert, dass die Wandstärke sehr stark reduziert (von 20 cm auf 1 cm) wird. Dadurch ergibt sich ein falsches Zonenvolumen, welches jedoch nach dem Importieren in TRNBuild korrigiert wird. Abbildung 3.8 zeigt das SketchUp Modell mit allen MPPF Modulen. Unter anderem ist auch der Schattenwurf (am 19.04. um 12:00 Uhr) zu erkennen. Die detaillierte Beschreibung der MPPF Module ist in den folgenden Kapiteln zu finden.

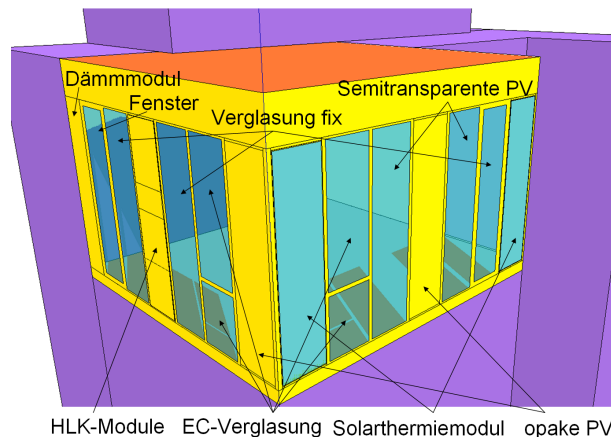


Abbildung 3.8.: 11 Zonen SketchUp Modell der Fassade mit allen MPPF Modulen.

### 3.4.1. Solarthermischer Kollektor

In der Prototypenfassade sind zwei unterschiedliche Kollektoren eingebaut. Dabei handelt es sich um einen Kollektor mit Kupferabsorber und einen mit Aluminiumabsorber. Beim Aluminium Modul wird zusätzlich zur konventionellen Wärmedämmung mit Mineralwolle, eine Vakuumdämmung installiert. Abbildung 3.9 zeigt den schematischen Aufbau beider Kollektortypen [29]. In der Simulation wird nur der Kollektor mit Kupferabsorber berücksichtigt, da hier der Fokus in der Modellbildung und nicht im unterschiedlichen Wandaufbau liegt. Der Wandaufbau des Kollektors mit Kupferabsorber in der Fassade ist in Tabelle 3.8 zu sehen. Mit den theoretischen Wärmeübergangswiderständen  $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2 \text{ K/W}$  für die äußere und  $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \text{ K/W}$  für die innere Bauteilschicht berechnet sich ein U-Wert nach Formel 3.5 von  $0,27 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . Das in der Standardausführung montierte opake Panel hat im Vergleich dazu einen ähnlichen U-Wert von  $0,23 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  (siehe Tabelle 3.3). Wird jedoch der solarthermische Kollektor

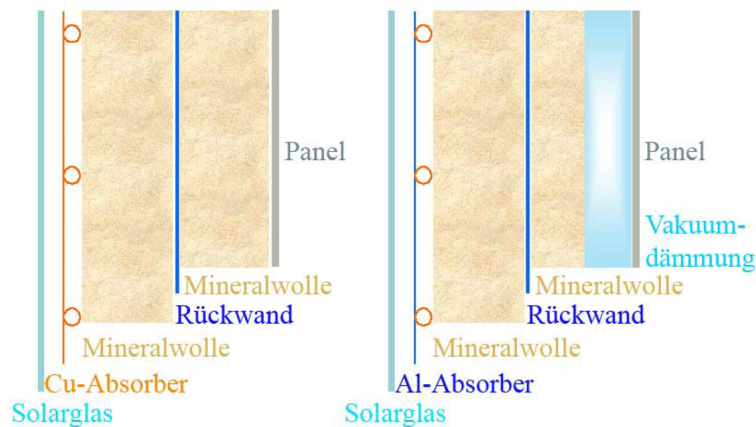


Abbildung 3.9.: Schematischer Kollektoraufbau der beiden unterschiedlichen Kollektortypen [29]

als Wandaufbau modelliert, so hat man keine Möglichkeit die Absorbtemperatur zu berechnen, bzw. eine Temperatur der Absorbenschicht zuzuweisen, da sich diese in der Wandschicht befindet. Es kann nur an den außen- bzw. innenliegenden Wandschichten eine Oberflächentemperatur berechnet, bzw. als Boundary Condition zugewiesen werden. Im Falle des Kollektors sind dies außen die Glasabdeckung und innen ein Abdeckpaneel. Aus diesem Grund wird der Kollektor als eine eigene thermische Zone betrachtet. Dies bedeutet, dass die Kollektorzone durch die geometrische Form eines Quaders, sechs Wandflächen besitzt, für die jeweils ein Wandaufbau definiert werden muss. Wie bereits in Kapitel 3.4 erwähnt, wird das Kollektormodul außen an die Bürozone aufgesetzt und würde bei korrekter geometrischer Darstellung einen Schattenwurf auf die Bürozone bewirken, der tatsächlich nicht vorhanden ist. Daher wird die Kollektorzone sehr dünn (1 cm) modelliert, sodass der Schattenwurf vernachlässigt werden kann. Abbildung 3.10 zeigt den Vergleich der beiden Kollektormodule, mit der tatsächlichen Wandstärke und

Tabelle 3.8.: Wandaufbau des Kollektors mit Kupferabsorber

Wand	Bauteilschicht	$d$ m	$\lambda$ W/m K	$R$ m <sup>2</sup> K/W	$U$ W/m <sup>2</sup> K
Kollektor Wandaufbau	Verblechung (Alu)	0,004	200	0,2 E-6	
	Steinwolle	0,08	0,04	2	
	Luftschicht	0,0285		0,18	
	Aluminium	0,001	200	5 E-6	
	Steinwolle	0,04	0,04	1	0,27
	Rohre-Luft	0,008		0,14	
	Kupferabsorber	0,0004	350	1,14 E-6	
	Luft	0,024		0,18	
	Glas	0,004	1	0,004	

dem realisiertem dünnen Modell. Eine weitere Vereinfachung betrifft den Energiefluss

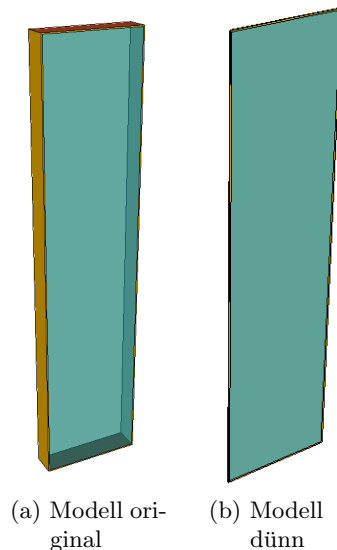


Abbildung 3.10.: Kollektormodelle

über die Umschließungsflächen (Rahmen) des Kollektormodells. Diese werden ebenfalls vernachlässigt, da der Kollektor im tatsächlichen Fall in die Fassade integriert ist und somit nur die Absorberfläche der Umgebung ausgesetzt ist. Daher muss diesen Wandflächen keine weitere Beachtung geschenkt werden. Der Zonenaufbau erfolgt entlang des Energiestromes von außen nach innen in folgendem Schema: Umgebung - Wandaufbau (Glas) - Raumluftknoten - Wandaufbau (Absorber + diverse Wandschichten) - Innenraum. D.h. der der Umgebung ausgesetzte Wandaufbau besteht nur aus einer Glasschicht. Ein weiterer Vorteil der Modellierung des solarthermischen Kollektors als eigene thermische Zone liegt in der Möglichkeit das Mikroklima im Kollektor zu beeinflussen,

### 3. Beschreibung und Modellierung des Fassadenprüfzentrums

da das Modell über ein Luftvolumen verfügt. In dieser Arbeit wird der Einfachheit halber nur mit einem konstanten Luftwechsel von  $0,1 \text{ h}^{-1}$  gerechnet. Nachteilig wirkt sich die Zone bei der Simulationsgeschwindigkeit, sowie bei der Dateneingabe aus, da nun weitere Parameter benötigt werden. Die benötigten Eingabeparameter sind in Abbildung 3.11 zu sehen. Dabei handelt es sich um den solaren Absorptionskoeffizienten am Kupferabsorber (0,85) und am Abdeckpaneel aus Aluminium (0,5) welches an den Büroraum grenzt. Weiters wird hier angegeben, dass der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  an der Absorberschicht intern berechnet werden soll, da die Oberflächentemperatur dieser Schicht sehr stark schwankt. Laut TRNSYS Dokumentation [20] wird für die interne Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten folgender Ansatz verwendet.

$$\alpha_{conv} = K \cdot (T_{surf} - T_{air})^e \quad (3.10)$$

In der Formel kommen die Parameter K und e vor. TRNSYS verwendet im Falle einer vertikalen Wand folgende default Werte für die beiden Konstanten.

$$K = 1,5 \quad (3.11)$$

$$e = 0,25 \quad (3.12)$$

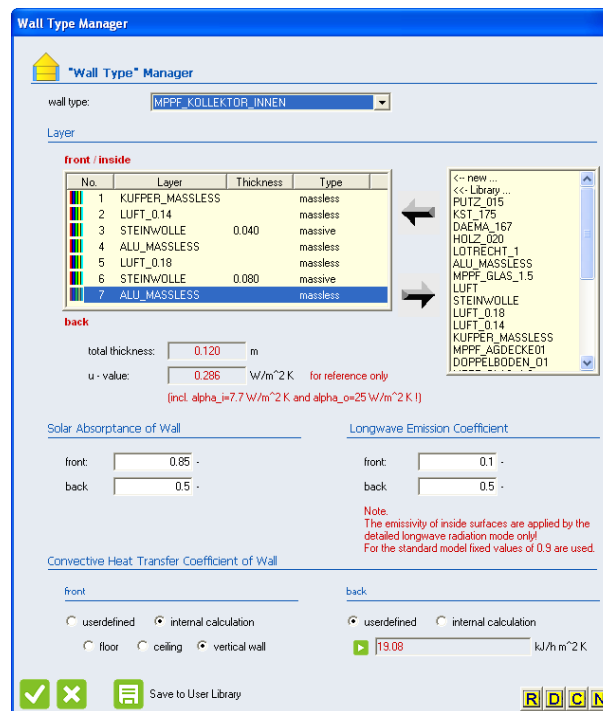


Abbildung 3.11.: TRNBuild Parameter für den Wandaufbau des Kollektormoduls.



Am Absorber beträgt der Absorptionskoeffizient ( $\alpha$ ) 0,85 und der Emissionskoeffizient ( $\epsilon$ ) 0,1 und an der Innenwand jeweils 0,5. Die Glasabdeckung des Kollektors wird in TRNBuild als Fenster interpretiert und kann somit durch die Parameter U-Wert und g-Wert definiert werden. Da die exakten Daten der Glasabdeckung (vor allem die Winkelabhängigkeit der relevanten Parameter) noch nicht bekannt sind, werden die Werte aus der Glasdatenbank übernommen. Es wird von einer Einscheibenverglasung mit hohem U-Wert ( $5,68 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ) und g-Wert (0,85) ausgegangen. Im Gegensatz zum einfachen Wandaufbau führt das Zonenmodell zu einer Temperaturerhöhung am Absorber aufgrund der einfallenden Strahlung durch die Glasabdeckung.

Um die thermische Kollektorzone einer Plausibilitätskontrolle zu unterziehen, wird das statische Kollektorsimulationsprogramm Kolektor 2.2 [13] verwendet. Dieses Programm berechnet unter anderem aufgrund der Einstrahlung und des Kollektoraufbaues den Temperaturverlauf im Kollektor. Die Position der berechneten Temperaturen (p1, p2, abs, z2, z1) ist in Abbildung 3.12 zu sehen. Im Vergleich zu TRNBuild sind mehr Eingabeparameter für die Berechnung notwendig. Die Eingabefenster und die Parameter sind im Anhang (Abbildung A.4 bis Abbildung A.7) dargestellt. Für die Berechnung muss ein Modell für den Strahlungsaustausch zwischen Glasabdeckung und Himmel sowie drei weitere Modelle für den Wärmefluss aufgrund von Konvektion gewählt werden. Sie sind von der Himmelstemperatur, der Windgeschwindigkeit und der Kollektorneigung abhängig. Die einzelnen Modelle werden hier aus Zeitgründen nicht näher im Detail beschrieben, sondern sie werden nach den Empfehlungen der Programmdokumentation [13] gewählt.

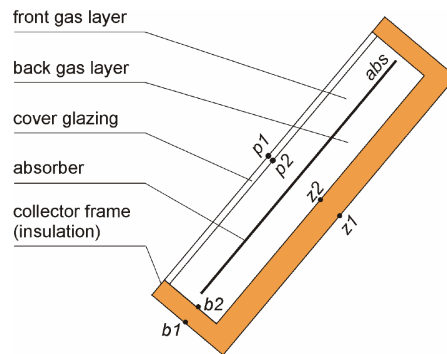


Abbildung 3.12.: Berechnete Temperaturen aus dem Programm Kolektor 2.2 [13]

In Tabelle 3.9 ist der Temperaturverlauf im Kollektor bei Verwendung von Kolektor 2.2 und TRNSYS dargestellt. Es wird angenommen, dass sich der Kollektor im Stagnationszustand befindet. Um diesen Zustand im Kollektorsimulationsprogramm Kolektor 2.2 abbilden zu können, muss aus Stabilitätsgründen ein sehr kleiner Massenstrom angegeben werden (siehe Abbildung A.4). Wird die thermische Kollektorzone in TRNBuild nicht weiter beeinflusst, entspricht diese einem Kollektor ohne Wärmeträgerinhalt, was im wesentlichen einen Stagnationszustand darstellt. In der TRNSYS-Simulation können die Oberflächentemperaturen der Glasscheibe (innen und außen), des Absorbers

und des Abdeckpanels ausgewertet werden. Da die Luftschicht hinter dem Absorber nur als Wandaufbau berücksichtigt wird, kann die Temperatur der Wärmedämmung im Vergleich zum Kollektorsimulationsprogramm nicht ausgewertet werden. Zusätzlich wird der TRNSYS Type 1b (Kollektortype) verwendet, um die Absorbertemperatur im Stagnationszustand zu bestimmen. Dieser Type verwendet ein Wirkungsgrad- Kennlinienverfahren. Der Wirkungsgrad des Kollektors ist folgendermaßen definiert [24].

$$\eta_{koll} = c_0 - c_1 \cdot \frac{\bar{T}_{abs,fl} - T_{amb}}{I_g} - c_2 \cdot \frac{(\bar{T}_{abs,fl} - T_{amb})^2}{I_g} \quad (3.13)$$

Die 3 Faktoren ( $c_0$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ) werden bei Leistungstest nach EN 12975-2 [22] der Kollektorvermessung bestimmt. Da es sich beim thermischen Kollektor um einen Prototypen handelt, sind die genauen Werte der Faktoren noch nicht bekannt. An ihrer Stelle werden folgende (übliche) Werte ( $c_0 = 0,78$ ,  $c_1 = 3,4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ,  $c_2 = 0,017 \text{ W/m}^2 \text{ K}^2$ ) gewählt.

Tabelle 3.9.: Temperaturverlauf im Kollektor in °C

Simulationsprogramm	Umgebung	Glas außen	Glas innen	Absorber	Dämmung innen	Wand	Raum
Kollektor 2.2	24	65	67	172	167	32	24
TRNSYS Zonenmodell	24	67	69	156	k.A.	31	24
TRNSYS Type 1b	k.A.	k.A.	k.A.	150	k.A.	k.A.	k.A.

Vergleicht man diese Temperaturen miteinander so sieht man, dass der Ansatz der thermischen Zone durchaus plausible Ergebnisse liefert. Der Unterschied bei der Absorbertemperatur ist zwar mit ca. 15°C relativ groß, jedoch liefern die weiteren Oberflächentemperaturen sehr gute Übereinstimmungen.

Die alleinige Betrachtung der thermischen Zone ohne Verbindung mit einer Anlagensimulation bzw. einer Messreihe aus gemessenen Absorbertemperaturen kann auch benutzt werden, um die Auswirkungen von (länger andauernden) Anlagenausfällen zu untersuchen.

Im Regelfall sollte der Stagnationszustand im Kollektor vermieden werden. Durch die Durchströmung des Kollektors hat der Absorber andere Temperaturen als in der oben angeführten Simulation. Daher muss eine Verbindung zwischen der Absorbertemperatur in der Zone und der tatsächlichen Absorbertemperatur hergestellt werden. D.h. man benötigt Informationen über die tatsächliche Absorbertemperatur. Diese Temperatur kann entweder durch eine Messung oder durch eine Anlagensimulation ermittelt werden. Die Kollektorzone muss im Betrieb auf diesen Zustand konditioniert werden. Eine Konditionierung der Kollektorzone ist in TRNBuild nur durch Aktivierung von Kühlung und Heizung möglich. Hier muss berücksichtigt werden, dass als Regelparameter nur die Temperatur des Raumluftknoten verwendet werden kann. In dieser Arbeit erfolgt

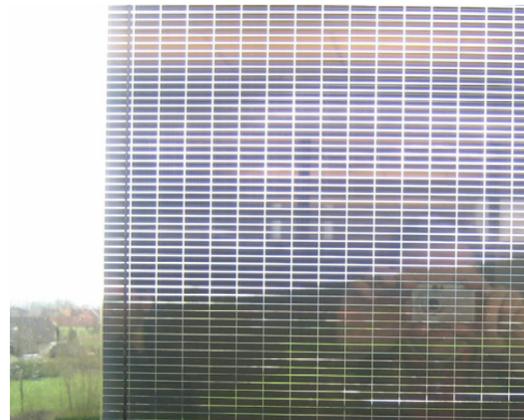
die Konditionierung der Kollektorzonentemperatur auf die Absorbtemperatur des simulierten Kollektorkreislaufes. Daher kann die auftretende Absorbtemperatur in der thermischen Zone von der simulierten Absorbtemperatur aus der Anlagensimulation kurzzeitig um bis zu ca.  $10^{\circ}\text{C}$  abweichen. Wird der Kollektor nicht als thermische Zone, sondern als reiner Wandaufbau modelliert, genügt die Randbedingung “Boundary Condition” um die simulierte Absorbtemperatur der entsprechenden Wandschicht im Gebäudetype zuzuweisen.

#### 3.4.2. Photovoltaikmodule

In der Prototypfassade sind zwei unterschiedliche Typen von Photovoltaiksystemen integriert. Anstatt der opaken Elemente in der Standardfassade kommen PV-Paneele auf Basis polykristalliner Technologie zum Einsatz. Amorphe semitransparente Siliziummodule (10 % und 20 % Transparenz) sind anstelle der Fixverglasung im Fensterbereich der Fassade angebracht. Sie sind zwischen zwei Glasscheiben integriert und haben neben der Aufgabe der Stromerzeugung die Funktion einer fixen Verschattung. Abbildung 3.13 zeigt die unterschiedlichen Technologien in der Prototypenfassade (Zusätzlich sind am rechten unteren Rand Messinstrumente zur Erfassung der Strahlung und der Windgeschwindigkeit zu sehen). Die genaue Platzierung der Module ist bereits in Kapitel 3 in Abbildung 3.2 beschrieben worden. Die Module mit polykristalliner Technologie werden in der Simulation nur als Wandaufbau berücksichtigt. Der Wandaufbau des PV-Paneels ist in Tabelle 3.10 [5] zu sehen. Wie bereits erwähnt werden für die U-Wert Berechnung die Wärmeübergangswiderstände von  $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2 \text{ K/W}$  für die äußere und  $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \text{ K/W}$  für die innere Bauteilschicht herangezogen. Somit ergibt sich für das PV-Paneel ein U-Wert von  $0,23 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ .



(a) Detail kristalline Photovoltaik und Messinstrumente für Strahlung und Windgeschwindigkeit



(b) Detail semitransparente Photovoltaik

Abbildung 3.13.: Unterschiedliche Photovoltaikmodule

Tabelle 3.10.: Wandaufbau des polykristallinen PV-Paneels

Wand	Bauteilschicht	$d$ m	$\lambda$ W/m K	$R$ m <sup>2</sup> K/W	$U$ W/m <sup>2</sup> K
	Verblechung (Alu)	0,004	200	0,2 E-6	
PV-Paneel	Steinwolle	0,16	0,04	2	0,23
Wandaufbau	Luftschicht	0,014		0,18	
	Glas	0,012	1	0,004	

Die durch die Photovoltaikzellen zusätzliche Erwärmung wird hier nicht berücksichtigt. Dies soll erst in weiterer Folge des MPPF-Projektes implementiert werden. Die in die Verglasung integrierten Dünnschichtzellen werden in der Simulation nur durch Ihre Funktion als Verschattungselemente berücksichtigt. D.h. es wird der Verglasung eine fixe interne Verschattung zugewiesen. Der Verschattungsgrad wird einmal mit 0,9 und bei der 2. Verglasung mit 0,8 angenommen. Durch den Ansatz einer internen Verschattung wird die zusätzliche Erwärmung der PV-Zellen zumindest etwas berücksichtigt. Dieser Ansatz muss in weiterer Folge des MPPF-Projektes noch genauer untersucht werden.

### 3.4.3. HLK-Gerät

Als HLK-Gerät kommt ein Fassadenlüftungsgerät der Firma LTG [10] zum Einsatz. Dieses Gerät erfüllt folgende Funktionen:

- Be- und Entlüftung
- Filterung der Luft
- Kühlen und Heizen im Außen- und Umluftbetrieb
- Wärme und Feuchterückgewinnung

Abbildung 3.14 zeigt das dezentrale HLK-Gerät. Es ist ca. 2700 mm hoch, 450 mm breit und 170 mm tief. Wie bereits erwähnt kann das Gerät im Außen- und/oder Umluftbetrieb eingesetzt werden. Desweiteren verfügt es über eine Stufenregelung des Zu- und Abluftvolumenstromes. Alle möglichen Betriebszustände sind im Anhang in Abbildung A.8 zu sehen.

Die grundsätzliche Funktion des Gerätes wird durch die folgende Beschreibung des Luftstroms durch das Gerät erklärt. Die Außenluft wird an der Unterseite des Gerätes vom Außenluftventilator durch einen Luftfilter angesaugt. Der Ventilator benötigt aufgrund seiner Bauart die gesamte Breite des HLK-Gerätes. Anschließend ist der Luftkanal im Gerät zweigeteilt und die Außenluft strömt in der außenliegenden Kammer bis zum Bereich der Feuchte- und Wärmerückgewinnung. Diese erfolgt durch ein Wärmerad. Die Außenluft durchströmt das Wärmerad von außen nach innen und wird dabei durch die Raumluft vorgewärmt bzw. vorgekühlt. Die vorkonditionierte Luft befindet sich nun in

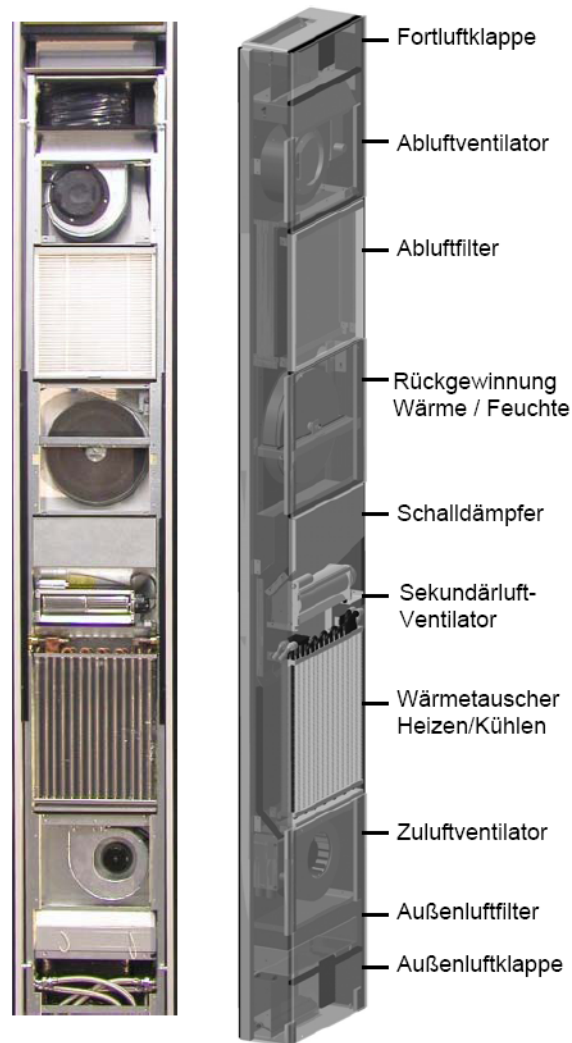


Abbildung 3.14.: Das dezentrale Fassadenlüftungsgerät [10]

der inneren Kammer des Gerätes. Von dort kann sie mit Hilfe des Sekundärventilators mit Raumluft gemischt werden. Anschließend wird der Luftstrom durch den Wärmetauscher geführt und durch Kühlen oder Heizen auf den gewünschten Betriebszustand konditioniert, bevor die Zuluft in den Raum eingeblasen wird. Für die Kühlung und Beheizung der Luft besitzt der Wärmetauscher einen Kalt- und einen Warmwasseranschluss. Im Zuge des MPPF-Projektes ist es angedacht, das Warmwasser für das HLK-Modul aus einem Warmwasserspeicher zu entnehmen, welcher von den solarthermischen Fassadenkollektoren gespeist wird. Die angesaugte Raumluft wird nach passieren des Abluftfilters sofort zur Wärme- und Feuchterückgewinnung geleitet. Nach Durchströmen des Wärmerades, wird die Abluft im fassadenseitigen Kanal vom Abluftventilator angesaugt und am oberen Ende des Gerätes in die Umgebung ausgeblasen.

### 3. Beschreibung und Modellierung des Fassadenprüfzentrums

Für die Modellbildung des HLK-Modules in TRNSYS wird der Betriebszustand “Nur Außenluftbetrieb” mit Ventilatorstufe III gewählt. Der Zuluftvolumenstrom von  $120 \text{ m}^3/\text{h}$  entspricht dabei einer Luftwechselzahl im Büroraum von  $1,3 \text{ h}^{-1}$ . Weiters wird anstatt der Wärme- und Feuchterückgewinnung nur die Wärmerückgewinnung in der Modellbildung berücksichtigt. Das Lüftungsgerät wird in verschiedene Temperaturbereiche eingeteilt, wobei jeder Bereich einer eigenen thermischen Zone entspricht. Dabei handelt es sich um

- eine Außenluftzone
- eine Zuluftzone
- eine Zwischenluftzone
- Zone mit Wärme- und Feuchterückgewinnung
- eine Abluftzone

Das Zonenmodell im Vergleich zum tatsächlichen HLK-Gerät ist in Abbildung 3.15 zu sehen. In dieser Arbeit wird das HLK-Gerät im Winterbetrieb betrachtet. Von we-

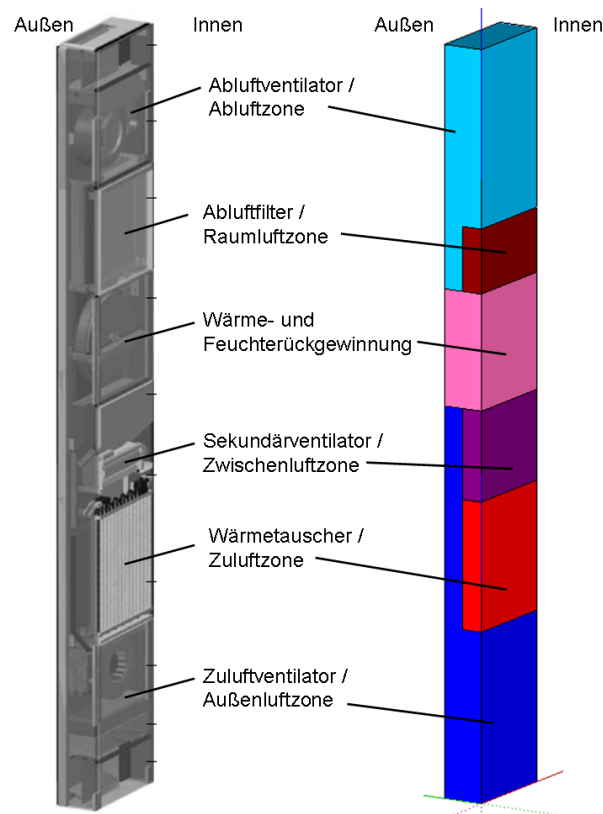


Abbildung 3.15.: Zonenmodell des dezentralen Raumlüftungsgerätes

sentlichem Interesse ist in diesen Fall die Außenluftzone (Blau hinterlegt), da hier die kältesten Temperaturen im Betrieb zu erwarten sind. Im Modell wird die Abwärme der Ventilatoren (27 W im Betrieb der Stufe III) in den Zonen Außenluft und Abluft als interner Gewinn berücksichtigt. Der Luftvolumenstrom in den Zonen wird in TRN-SYS über einen eigenen Ventilation Type geregelt. Dieser bestimmt für jede Zonen den Luftvolumenstrom und die Lufttemperatur. Der Luftvolumenstrom beträgt aufgrund der gewählten Betriebsart (Nur Außenluftbetrieb, Stufe III) in allen Zonen  $120 \text{ m}^3/\text{h}$ . Die Einblasetemperatur in die jeweilige Zone wird ebenfalls vorgegeben und ermittelt sich wie folgt. Für die Außenluftzone wird die Umgebungslufttemperatur ( $T_{amb}$ ) des Wetterdatenfiles gewählt. Die Einblasetemperatur der Zuluftzone beträgt im Winterfall  $23^\circ\text{C}$ . (Ausgehend von den Nutzungsbedingungen laut Tabelle 3.7). Die Beheizung des Raumes über das HLK-Gerät ist im MPPF-Projekt vorgesehen, in dieser Arbeit jedoch noch nicht berücksichtigt (Siehe Kapitel Ausblick 8). Die Raumlufthzone hat die Raumlufthtemperatur als Randbedingung. Für die Zone der Wärmerückgewinnung wird der Mittelwert von Umgebungslufttemperatur und Raumlufthtemperatur verwendet. Die Temperaturen nach der Wärmerückgewinnung in den Zonen Abluft und Zwischenluft werden mit Hilfe einer sehr einfachen Anlagensimulation des Wärmetauschers bewerkstelligt. Dabei wird ein einfacher Type eines Luft-Luft Wärmetauscher verwendet. Die Beschreibung der Anlagensimulation ist in Kapitel 4.2 zu finden.

#### 3.4.4. Elektrochrome Verglasung

Wie bereits in Kapitel 3 angeführt, werden in die multifunktionelle Fassade 2 Module mit elektrochromer Verglasung integriert. Dabei handelt es sich um Verglasungselemente die ihren Lichttransmissionsgrad in Abhängigkeit eines externen elektrischen Signals verändern können. Im Annexbericht "Der REALE Prototyp im zweiten Projektjahr" [11] ist die Funktionsweise der elektrochromen Verglasung detailliert angeführt. Die Struktur ist in Abbildung 3.16 zu sehen.

*Die Struktur des elektrochromen Glases ist vergleichbar mit einer Verbundglasscheibe, die sich aus zwei TCO-beschichteten Gläsern zusammensetzt (TCO = transparent conductive oxide, z.B. fluordotiertes Zinnoxid), die mit Wolframoxid bzw. einem Mischoxid beschichtet und über eine Lithium ionenleitfähige Polymerfolie miteinander verbunden sind. Legt man eine niedrige Gleichspannung, z.B. 3V an die Schichten an, so bewegen sich die Lithiumionen zu der farblosen Wolframoxid-Schicht, die in Folge der Aufnahme der Lithiumionen zu blauem Wolframoxid reduziert wird. Eine Umpolung der Stromrichtung führt zu einer Entfärbung der Beschichtung.*

Das elektrochrome Verbundglas wird auf der Raumseite zusätzlich mit einem Isolierglas mit low-e-Beschichtung kombiniert, um beste wärmetechnische Eigenschaften erzielen zu können. D.h. das Modul elektrochrome Verglasung besteht in Summe aus drei Glasscheiben. Aus diesem Grund wird in der Modellbildung die EC-Verglasung als Glaselement mit regelbarer Außenverschattung abgebildet. Da der Vorgang der Glastransmissionsveränderung von Status hell auf Status dunkel ca. 15 Minuten benötigt, wird im Modell

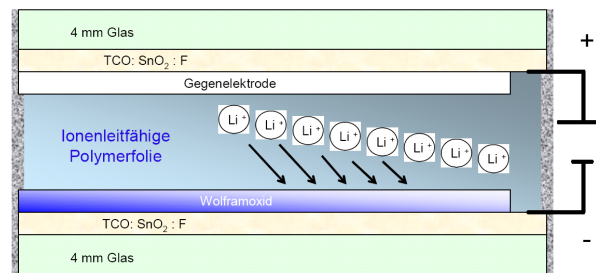


Abbildung 3.16.: Struktur eines elektrochromen Verbundglases ([11])

ein Tot-Zeit-Glied eingesetzt um diesen Zeitverzug abbilden zu können. Der Aufbau des Modules ist in Abbildung 3.17 und die Eigenschaften sind in Tabelle 3.11 ersichtlich. Um diese Eigenschaften in TRNBuild abzubilden, wird aus der Modellbibliothek eine Verglasung mit ähnlichen Eigenschaften ausgewählt. Da es keine einfache Möglichkeit gibt den g-Wert der Verglasung während der Simulation zu verändern wird dies in der Simulation nicht berücksichtigt. Anstatt dessen wird eine Verglasung mit etwas niedrigerem g-Wert gewählt (0,31 anstatt 0,38). Die Änderung des Transmissionsgrades ist hingegen einfach zu realisieren. In der Realität sind zwischen dem Status hell und dunkel drei weitere Zustände möglich. In der Simulation wird jedoch nur der Zustand hell (Stufe 1) und dunkel (Stufe 5) berücksichtigt. Die Regelung der EC-Gläser erfolgt nach den gleichen Kriterien wie bei der Regelung der innen liegenden Verschattungselemente (siehe Tabelle 3.7).

Tabelle 3.11.: Eigenschaften des elektrochromen Glasmodules mit 2-fach Isolierglas ([11])

Zustand des Glasmodules	Lichttransmissionsgrad %	U-Wert W/m <sup>2</sup> K	g-Wert %
Stufe 1 hell	50	1,1	38
Stufe 5 dunkel	15	1,1	12



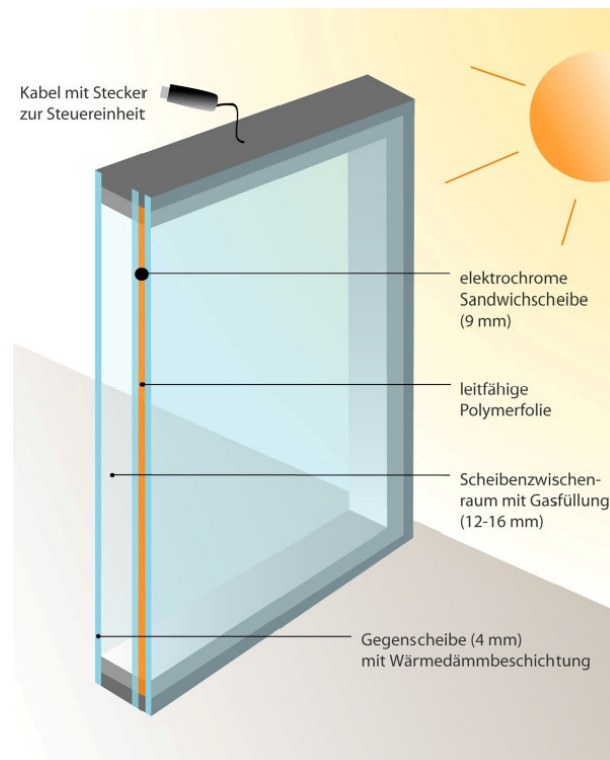


Abbildung 3.17.: Aufbau der elektrochromen Verbundglasscheibe ([11])

## 4. Anlagenmodellierung

Die Anlagensimulation der multifunktionellen Komponenten wird in dieser Arbeit nur am Rande betrachtet. Sie dient hauptsächlich dazu die notwendigen Eingabedaten für die Gebäudesimulation zu ermitteln. Aufgrund der Komplexität wird hier auf eine detaillierte Abbildung verzichtet. Daher werden keine Angaben über simulierte Erträge aus den multifunktionellen Komponenten (Solarthermie und Photovoltaik) gemacht. Es werden nur einfache Simulationen für den Kollektorkreislauf sowie das HLK-Gerät durchgeführt um zu gewährleisten, dass trotz der starken Vereinfachung das anlagentypische Verhalten in der Gebäudesimulation berücksichtigt wird.

### 4.1. Kollektorkreislauf

Im Prototypengebäude ist der Kollektorkreislauf folgendermaßen integriert. Die beiden Kollektorfelder beladen einen 500 Liter Solarwärmespeicher. Der Solarwärmespeicher und die dazugehörige Pumpengruppe, das Ausdehnungsgefäß und die Steuereinheit befinden sich eine Etage unterhalb des Prototypenraumes. Die Rohrleitungen von den Kollektorfeldern zum Solarwärmespeicher sind in die Fassade integriert. Des Weiteren ist angedacht dass der Pufferspeicher als Energieversorgung für das HLK-Gerät eingesetzt wird. Das realisierte Hydraulikschema ist in Abbildung 4.1 zu sehen. [29].

In der Modellierung wird der Kollektorkreislauf stark vereinfacht. Er dient in dieser Arbeit hauptsächlich dazu die Absorbtemperatur zu bestimmen. Diese wird in der Gebäudesimulation in der Kollektorzone benötigt, wenn der Kollektorkreislauf in Betrieb ist und sich, abhängig von der Eintrittstemperatur in den Kollektor und die Einstrahlung auf die Kollektorebene, unterschiedliche Absorbtemperaturen einstellen. Die Einbindung des HLK-Gerätes als Abnehmer aus dem Solarwärmespeicher wird hier nicht betrachtet, da dies zum Zeitpunkt der Erstellung ebenfalls noch nicht realisiert wurde. Folgende TRNSYS Types werden in der Modellbildung eingesetzt.

- Kollektor: Type 1b Kollektor mit Kennlinie 2. Ordnung
- Solarwärmespeicher: Type 4c Schichtladespeicher ohne interne Nachheizung
- Pumpe: Type 3b Einfaches Pumpenmodell
- Steuereinheit: Type 2b zur Steuerung des Kollektorkreislaufes

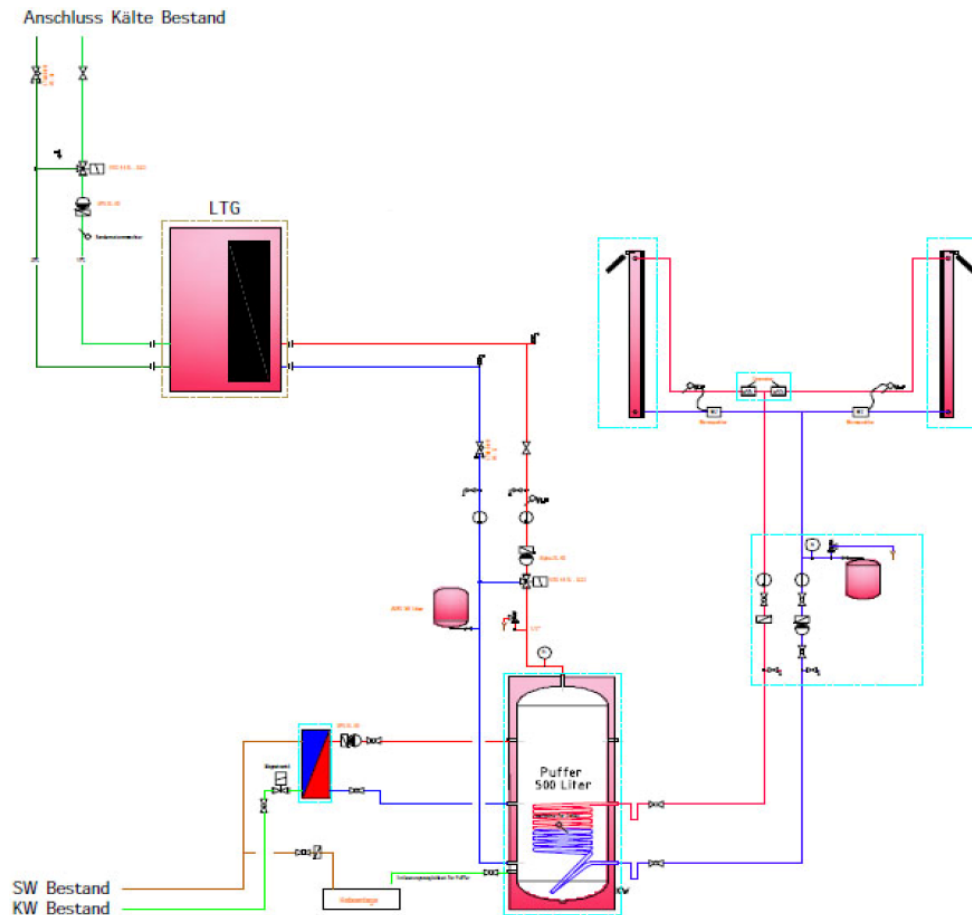


Abbildung 4.1.: Hydraulikschema [29]

Die Rohrleitung werden aufgrund der relativ kurzen Länge im Modell nicht berücksichtigt. Die TRNSYS Types und ihre gewählten Parameter werden im folgenden Absatz nochmal detaillierter dargestellt.

#### 4.1.1. TRNSYS Type Kollektor

Der TRNSYS Type 1b verwendet für die Abbildung des Kollektors ein Wirkungsgrad-Kennlinienverfahren 2. Ordnung. Die Formel für den Kollektorwirkungsgrad wurde bereits in Kapitel 3.4.1 erläutert, sei aber hier nochmals angeführt.

$$\eta_{koll} = c_0 - c_1 \cdot \frac{\bar{T}_{abs,fl} - T_{amb}}{I_g} - c_2 \cdot \frac{(\bar{T}_{abs,fl} - T_{amb})^2}{I_g} \quad (4.1)$$

Der Type 1b benötigt die drei Faktoren ( $c_0$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ) als Eingabeparameter. Sie werden bei Leistungstest nach EN 12975-2 [22] der Kollektorvermessung bestimmt. Da

diese Faktoren derzeit noch nicht ermittelt wurden, werden folgende (übliche) Werte ( $c_0 = 0,78$ ,  $c_1 = 3,4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ,  $c_2 = 0,017 \text{ W/m}^2 \text{ K}^2$ ) gewählt. Der Massenstrom durch den Kollektor wird mit  $165 \text{ kg/h}$  angenommen. Dabei handelt es sich um ein High Flow Prinzip ( $40 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$ ). Die weiteren benötigten meteorologischen Eingabedaten (Strahlung, Temperatur, etc.) werden aus dem Wetterdatenleser dem Kollektortype zugewiesen. Die Kollektoreintrittstemperatur wird aus dem Warmwasserspeicher ermittelt. Mit diesen Daten kann die Kollektoraustrittstemperatur zu jedem Zeitpunkt ermittelt werden. Die mittlere Absorbertemperatur wird anschließend durch Mittelwertbildung der Kollektorein- und Kollektoraustrittstemperatur berechnet. Die beiden unterschiedlichen Kollektortypen werden in der Simulation noch nicht berücksichtigt, da es derzeit noch keine Wirkungsgradkennlinie der beiden Typen gibt. Statt dessen wird die Fläche des Kollektortypes verdoppelt. D.h. in der Simulation werden beide Kollektorfelder als ein Kollektorfeld mit doppelter Größe ( $4,125 \text{ m}^2$ ) modelliert.

#### 4.1.2. TRNSYS Type Solarwärmespeicher

Als Solarwärmespeicher wird der Type4c verwendet, welcher als idealer Schichtladespeicher mit Nachheizelementen interpretiert werden kann. Der  $500 \text{ l}$  Speicher wird durch 6 Temperaturknoten zu je einer Höhe von  $0,3 \text{ m}$  modelliert. Idealer Schichtladespeicher bedeutet, dass der Volumenstrom aus dem Kollektoraustritt immer in den passenden Temperaturknoten eingespeist wird. Die Speicherverluste werden durch Eingabe eines Tank Loss Coefficient berechnet. Dieser hat die Einheit  $\text{W/m}^2 \text{ K}$  und kann als U-Wert des Speichers interpretiert werden. Die Oberfläche des Speichers wird als Zylinder interpretiert. Sie wird durch Eingabe des Volumens und der Speicherhöhe berechnet. Da derzeit noch kein Verbraucher an den Wärmespeicher angeschlossen ist, führen nur die Speicherverluste zu einer Abkühlung der Speichertemperatur. Die Nachheizelemente sind im Modell derzeit nicht aktiviert, da kein Verbraucher angeschlossen ist. Daher tritt in der Jahressimulation der Fall auf, dass der Kollektorkreislauf in Stagnation geht. Dies ist der Fall, wenn die oberste Temperaturknoten im Solarwärmetauscher  $95^\circ\text{C}$  überschreitet.

#### 4.1.3. TRNSYS Type Pumpe

Die Solarpumpengruppe wird im Modell mit Hilfe des Type 3b realisiert. Sie gibt den Massenstrom durch den Kollektorkreislauf vor und wird über ein Steuerglied geregelt. Es werden nur 2 Stellungen (EIN und AUS) in der Simulation berücksichtigt. D.h. der Massenstrom aufgrund der Pumpe im Kollektorkreislauf beträgt entweder  $0 \text{ kg/h}$  (Steuersignal = 0) oder  $165 \text{ kg/h}$  (Steuersignal = 1). Ein Massenstrom von  $165 \text{ kg/h}$  und einer Kollektorfläche von  $4,125 \text{ m}^2$  ergeben einen spezifischen Volumenstrom von  $40 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$ .

#### 4.1.4. TRNSYS Type Steuereinheit

Wie bereits erwähnt dient die Steuereinheit zur Regelung des Durchflusses durch den Kollektorkreislauf. Dazu wird der Type 2b verwendet. Die Steuereinheit liefert das Signal 1 (die Pumpe schaltet ein), wenn die Kollektoraustrittstemperatur 5 K größer als die Speichertemperatur im obersten Temperaturknoten ist. Um häufige Schaltvorgänge zu vermeiden wird die Pumpe abgeschaltet wenn die Temperaturdifferenz zwischen Kollektoraustritt und Speichertemperatur im obersten Knoten 2 K unterschreitet. Des Weiteren wird die Pumpe abgeschaltet wenn die Speichertemperatur 95°C überschreitet.

#### 4.2. HLK-Gerät

Die Anlagensimulation des HLK-Gerätes besteht hier nur aus einem TRNSYS Type, welcher die Temperaturen nach der Wärmerückgewinnung simuliert. Dabei handelt es sich um einen Luft-Luft-Wärmetauscher. Das Wärmetauschermodell ist schematisch in Abbildung 4.2 ersichtlich. Laut Herstellerangaben hat das HLK-Gerät eine Rückwärme-

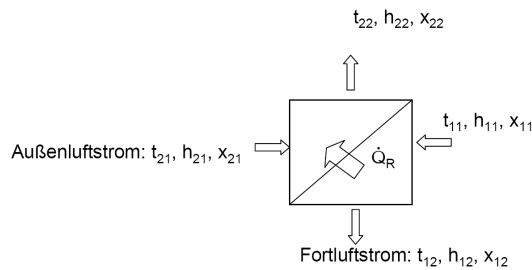


Abbildung 4.2.: Schema eines Wärmeübertragers

zahl (WRG-Zahl) von 0,54. Die WRG-Zahl bezogen auf den Außenluftstrom ist definiert als ([7]):

$$\phi_{Au} = \frac{t_{22} - t_{21}}{t_{11} - t_{21}} \quad (4.2)$$

Die WRG-Zahl bezogen auf den Fortluftstromluftstrom ist definiert als:

$$\phi_{Fo} = \frac{t_{11} - t_{12}}{t_{11} - t_{21}} \quad (4.3)$$

Der Zusammenhang zwischen  $\phi_{Au}$  und  $\phi_{Fo}$  lautet wie folgt:

$$\phi_{Au} = \frac{\dot{m}_{Fo} \cdot c_{pFo}}{\dot{m}_{Au} \cdot c_{pAu}} \cdot \phi_{Fo} \quad (4.4)$$

Obwohl laut Hersteller das Gerät für eine Wärme- und Feuchterückgewinnung ausgelegt ist, wird in dieser Arbeit der Einfachheit halber nur die Wärmerückgewinnung berück-

sichtigt. Daher gilt bei gleichem Massenstrom  $\phi_{Au} = \phi_{Fo} = \phi$ . Der TRNSYS Type berechnet den Wärmefluss zwischen beiden Luftströmen folgendermaßen

$$\dot{Q}_{sens} = \phi \cdot \dot{m} \cdot cp \cdot (t_{11} - t_{21}) \quad (4.5)$$

Somit wird die jeweilige Temperatur des Zu- sowie des Abluftstromes nach dem Wärmetauscheraustritt ermittelt und der Gebäudesimulation als Eingabeparameter zugewiesen.

## 5. Aufbau der TRNSYS-Simulation

In diesem Kapitel wird der Aufbau der Jahressimulation in TRNSYS erläutert. Dabei werden die notwendigen Komponenten miteinander verknüpft und eine Jahressimulation durchgeführt. Bei den Komponenten handelt es sich im Wesentlichen um das Gebäudemodell (Type 56), beschrieben in Kapitel 3 sowie die benötigten Anlagenkomponenten aus Kapitel 4. Zusätzlich werden noch weitere TRNSYS Types verwendet um die Gebäudesteuerung, die Datenauswertung und das Einlesen von Wetterdaten zu realisieren. Abbildung 5.1 zeigt den Aufbau der Simulation im Simulation Studio. Um eine Überschaubarkeit zu gewährleisten sind die unterschiedlichen Types in mehrere Makros zusammengefasst. Grundsätzliche Simulationseinstellungen werden in die Control Card eingegeben.

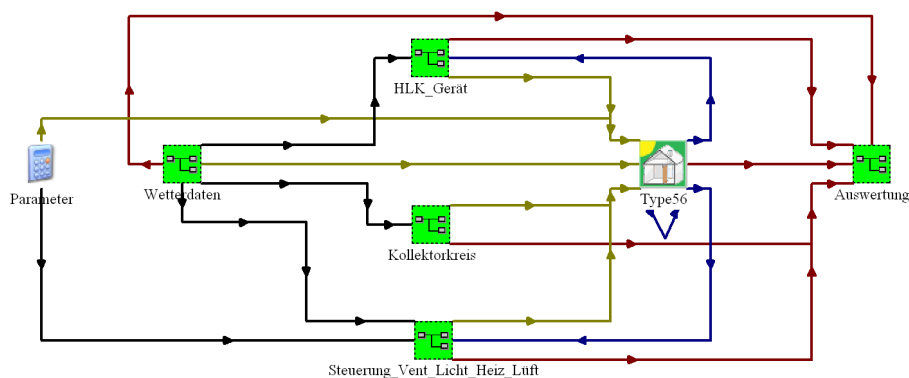


Abbildung 5.1.: Aufbau der Jahressimulation

### 5.1. Control Card

Bei den wichtigsten Einstellungen in der sogenannten Control Card handelt es sich um:

- Startzeitpunkt, Stoppzeitpunkt und Zeitschrittweite

Da es sich um eine Jahressimulation handelt, wird der Startzeitpunkt mit der Stunde 0 und der Stoppzeitpunkt mit der Stunde 8760 festgelegt. Bei der Simulationszeitschrittweite wird zwischen der Simulation mit der Standardfassade und

der MPPF-Fassade unterschieden. Bei der Standardfassade kann mit einer Zeitschrittweite von 1h simuliert werden. Bei der MPPF-Fassade hingegen wird die Zeitschrittweite auf 15 Minuten Intervalle (=0,25 h) verkürzt. Dies ist notwendig da einerseits die Steuerung der elektrochromen Gläser eine Zeitverzögerung von 15 Minuten hat und andererseits die Temperaturschwankungen in den multifunktionalen Fassadenelementen größer sind und daher kürzere Zeitschritte notwendig sind. Als Anfangsbedingung wird die Raumzone mit 20°C initialisiert. Aufgrund der geringen thermischen Speichermassen kann der Einschwingvorgang vernachlässigt werden.

- Convergence Criteria

Die Verknüpfungen in TRNSYS haben zur Folge, dass z.B. der Output des Types A, der Input des Types B ist. Mit diesem Input berechnet Type B seinerseits wiederum die für diesen Type charakteristischen Outputs. Da es in der Gebäude- und Anlagensimulation oftmals vorkommt, dass Informationen in Schleifen geführt werden (z.B. Output von Type B ist wiederum Input von Type A) muss ein Konvergenz Kriterium definiert werden. TRNSYS rechnet solange im Kreis, bis sich die Differenz der jeweiligen Outputs nicht mehr unterscheidet, bzw. das Konvergenz Kriterium unterschreiten. In dieser Simulation ist das Abbruchkriterium mit  $10^{-3}$  definiert. Wird dieses Kriterium nach 100 Berechnungsschritten nicht erreicht bricht TRNSYS die weitere Berechnung ab und rechnet mit dem letzten Wert weiter. Zusätzlich wird eine Warnung des betroffenen Zeitschritts in ein Log-File geschrieben.

- Differentiation Equation Method

TRNSYS bietet 3 verschiedene Algorithmen zur Lösung von Differentialgleichungen an dabei handelt es sich um [20]:

- Modified-Euler method (2nd Order Runge-Kutta method)
- Non-self-starting Heun's method (a 2nd order Predictor-Corrector method)
- Fourth-order Adams method (a 4th order Predictor-Corrector method)

Für die Jahressimulation wird die "Modified-Euler" Methode verwendet.

## 5.2. Makro Wetterdatenleser

Hinter dem Makro Wetterdaten befinden sich 3 TRNSYS Types. Der wichtigste Type ist der Wetterdatenleser. Die Wetterdaten bestehen in der Regel aus ein einem Textfile. Sie können aus gemessenen Werten oder generierten Daten stammen. Für diese Simulation wird auf generierte Wetterdaten zurückgegriffen. Diese werden durch das Programm Meteonorm V4 generiert [14]. Das Programm verwendet langjährige Messreihen und



generiert aufgrund statistischer Funktionen einen Wetterdatensatz für einen beliebigen Standort. Die dazu verwendeten Messreihen stammen von Wetterstationen.

### 5.3. Gebäude Type 56

Hinter dem Type 56 verbirgt sich die gesamte Information des Gebäudes. Die detaillierte Beschreibung des Gebäudetypes und die dazugehörigen Parameter sind in Kapitel 3 bereits erläutert worden.

### 5.4. Makro Kollektorkreislauf

Abbildung 5.2 zeigt den Aufbau des Kollektorkreislaufes mit den TRNSYS Types. Zusätzlich zu den bereits beschriebenen Types in Kapitel 4.1 wird ein Type für die Mittelwertbildung der Absorbtemperatur, ein Type für die Einheitenumrechnung und ein Type für die Auswertung der Kollektortemperaturen verwendet.

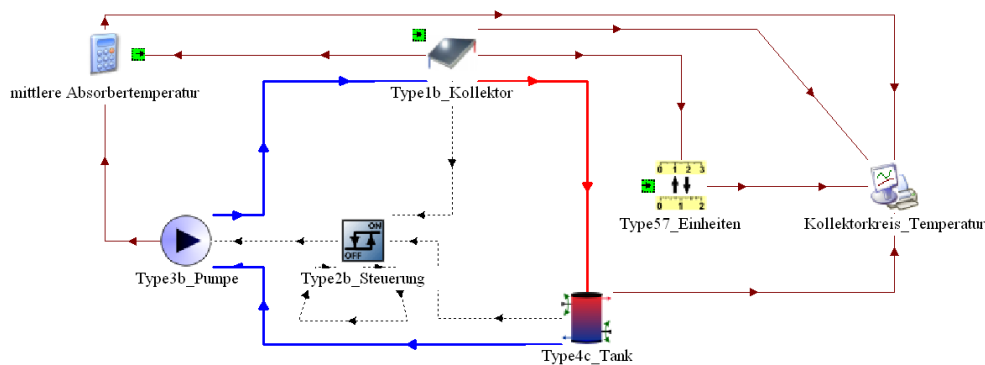


Abbildung 5.2.: Trnsys Aufbau des Kollektorkreislaufes

### 5.5. Makro HLK-Gerät

Hinter diesem Makro verbirgt sich der TRNSYS Type für den Luft-Luft-Wärmetauscher. Die Beschreibung und Funktionsweise für das HLK-Gerät ist in Kapitel 3.4.3 und 4.2 bereits dargelegt.

## 5.6. Makro Steuerung-Vent-Licht-Heiz-Luft

Dieses Makro beinhaltet alle notwendigen Types um die gebäudetechnischen Anlagen wie Ventilation, Beleuchtung, Heizung und Lüftung zu steuern. Diese Regelparameter können für unterschiedliche Untersuchungen relativ einfach variiert werden und sind in Tabelle 3.7 bereits angeführt worden.

## 5.7. Makro Auswertung

Um die Jahressimulation auswerten zu können werden die gewünschten Größen in externe Textfiles geschrieben. Dazu werden mehrere sogenannte Plotter eingesetzt um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten. Neben den Balance-Files, die die für die Erstellung der Energiebilanz notwendigen Ergebnisse beinhalten, werden gezielt auch einzelne Temperaturen (z.B. aus dem Kollektorkreislauf oder Wandoberflächentemperaturen) explizit ausgewählt ausgewertet und auf Plausibilität überprüft. Um einen raschen Überblick über den Simulationsverlauf zu bekommen werden sogenannte Online-Plotter eingesetzt. Diese stellen Ergebnisse in Form von Graphen des Simulationsverlaufs in Diagrammen dar.

## 6. Ergebnisse

### 6.1. Simulationsergebnisse des Büroraumes mit Standardfassade

In diesem Abschnitt werden verschiedene Simulationsergebnisse der Simulation mit der Standardfassade angeführt. Die Basisvariante (Szenario 1) hat die Nutzungsbedingungen wie in Tabelle 3.7 aufgelistet, als Grundlage. Die Simulation wird mit dem neuen dreidimensionalen Strahlungsmodell durchgeführt. Davon ausgehend wird exemplarisch je ein Parameter variiert um den Einfluss auf das Ergebnis herauszufinden. Bei den variierten Parameter handelt es sich um:

- Kühl- und Heizleistung wird unlimitiert - Szenario 2
- Es wird das alte Strahlungsmodell verwendet- Szenario 3
- Die Gebäudeeigenverschattung wird vernachlässigt - Szenario 4
- Die Anbringung der Verschattungselemente erfolgt außen - Szenario 5
- Die Gebäudeausrichtung wird Richtung Süden verändert - Szenario 6

Um die unterschiedlichen Szenarien zu vergleichen wird nach der durchgeführten Jahres-simulation die Energiebilanz ausgewertet. Diese ist in Abbildung 6.1 für die Basisvariante zu sehen. Sie stellt die spezifische Energiemenge bezogen auf die Grundfläche dar und wird in Gewinne (linke Säule) und Verluste (rechte Säule) unterteilt. Auf der Gewinnseite (linke Säule) werden solare Erträge (gelb), interne Gewinne (orange), Heizung (rot), Infiltrationsgewinne (dunkelblau), Lüftungsgewinne (hellblau) und Transmissionsgewinne (türkis) bilanziert, welche dem Raumluftknoten zugeführt werden. Auf der Verlustseite (rechte Säule) werden Transmissionsverluste (türkis), Infiltrationsverluste (dunkelblau), Lüftungsverluste (hellblau) und die Kühlung (grau) erfasst. Da es sich um eine Bilanz handelt, sind über das Jahr gesehen beide Balken gleich groß. Zu den Lüftungsgewinnen und -verlusten ist ein wichtiger Punkt anzumerken. Wie bereits in Kapitel 3.2 erwähnt, wird dem Büroraum über die Lüftungsanlage vorkonditionierte Luft zugeführt. Diese dient unter anderem dazu, den Raum zu kühlen oder zu beheizen. Die Zulufttemperatur beträgt im Kühlbetrieb  $18^{\circ}\text{C}$ , im Heizbetrieb im Winter  $23^{\circ}\text{C}$  und in der Übergangszeit  $21^{\circ}\text{C}$ . Die in der Energiebilanz dargestellten Lüftungsgewinne und -verluste beziehen sich auf die Temperaturdifferenz zwischen Raumluft- und Zulufttemperatur. Die Säule der Lüftungsgewinne ist in allen Fällen sehr klein, da die Raumlufttemperatur fast immer größer als die Zulufttemperatur ist. Auf der Verlustseite ist die

Energiemenge in der Bilanz ersichtlich (ca. 20 kWh/m<sup>2</sup>), da die Lüftung hauptsächlich den Raum in der Betriebszeit kühlt. Jedoch wird nicht die Energiemenge bilanziert welche notwendig ist, die Außenluft auf den Zuluftzustand zu konditionieren. Diese muss zusätzlich berechnet werden. Die Energiemenge für die Vorkonditionierung ist nicht von den Szenarien abhängig sondern für alle konstant, da hier nur die Temperaturdifferenz zwischen Außenluft- und Zulufttemperatur maßgeblich ist. Für die Berechnung wird das Raumvolumen, die Luftwechselrate, die Dichte der Luft, die spezifische Wärmekapazität, die Temperaturdifferenz und die Betriebszeit der Anlage benötigt. Die Formel lautet:

$$Q_{\text{Lueftung}} = V_{\text{Raum}} * n_{\text{Raum}} * \rho_{\text{Luft}} * c_{\text{Luft}} * (T_{\text{Zuluft}} - T_{\text{Amb}}) \quad (6.1)$$

Wird diese Gleichung in der Jahressimulation mit Berücksichtigung der Anlagenbetriebszeit aufsummiert so ergibt sich ein Heizenergiebedarf für die Zuluftkonditionierung von 608 kWh bzw. 22,2 kWh/m<sup>2</sup> und ein Kühlenergiebedarf von 31 kWh bzw. 1,1 kWh/m<sup>2</sup>

### 6.1.1. Szenario 1 - Basisvariante

Die Basisvariante basiert auf der Beschreibung in Kapitel 3.2 und den Nutzungsbedingungen aus Tabelle 3.7. Wie aus der linken Säule leicht zu erkennen ist, hat der Büroraum einen sehr hohen Ertrag aus solaren Gewinnen (ca. 266 kWh/m<sup>2</sup>). Dies liegt einerseits an dem relativ hohem Glasanteil der Fassade. Dieser beträgt bezogen auf die gesamte Fassadenfläche auf der Westfassade 48,2%, auf der Südfassade 45,9%, und auf der Ostfassade 93,1%. In Summe hat die nach außen orientierte Fassadenfläche 41,9 m<sup>2</sup>, wobei davon 23,5 m<sup>2</sup> davon aus Glas bestehen. Dies ergibt einen Glasanteil über die gesamte Fassade von ca. 56%. Andererseits liegt der hohe solare Ertrag an den innen angebrachten Verschattungselementen und deren Steuerung.

Desweiteren sind die internen Lasten die aufgrund von Personen- und Maschinenabwärmern (PC-Arbeitsplätze) entstehen ebenfalls relativ hoch. Mit fast 74 kWh/m<sup>2</sup> sind diese höher als der notwendige Energiebedarf fürs Heizen (ca. 69 kWh/m<sup>2</sup>). Auf der Verlustseite sind die Transmissionsverluste mit knapp 280 kWh/m<sup>2</sup> am größten. Die Verluste aufgrund Infiltration und Ventilation sind dagegen um eine Größenordnung kleiner. Die restliche Energie muss dem Raum in Form von Kühlung entzogen werden. Dafür müssen pro Jahr ca. 100 kWh/m<sup>2</sup> aufgewendet werden. Charakteristisch für einen Büroraum mit einer Fassade mit hohem Glasanteil ist, dass der Kühlbedarf meist höher als der Heizbedarf ist. Dies ist hier ebenfalls leicht zu erkennen. Abbildung 6.2 zeigt das Überschreitungsdiagramm für Kühl- und Heizleistung. Auf der horizontalen Achse sind die Jahresstunden und auf der vertikalen Achse ist die Leistung aufgetragen. Die Heizungsanlage ist nur ca. 1670 und die Kühlanlage ca. 1940 Stunden im Jahr im Betrieb. Während die Heizleistung durch die Begrenzung auf 2,7 kW ca. 250 h auf Vollast läuft, läuft die Kühlanlage nur für einen sehr kurzen Zeitraum auf der Nennlast von 3,4 kW.

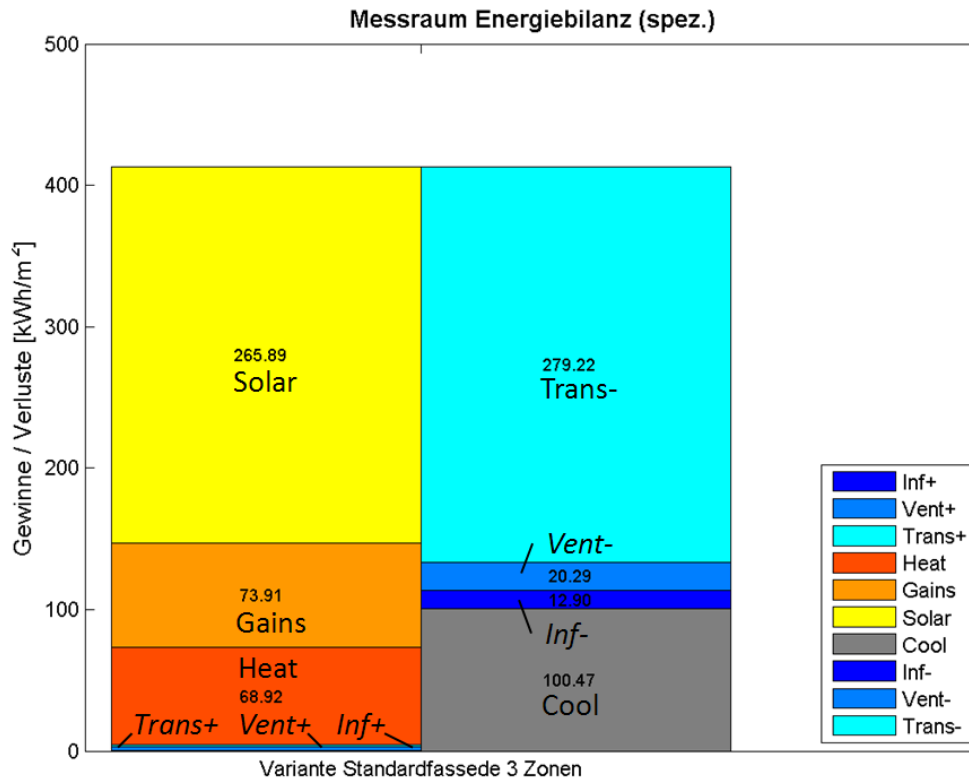


Abbildung 6.1.: Energiebilanz des Büroraumes mit Standardfassade (Szenario 1)

### 6.1.2. Szenario 2 - unlimitierte Kühl- und Heizleistung

Um die maximale Kühl- und Heizleistung zu bestimmen wird ein Szenario mit unlimitierter Kühl- und Heizleistung simuliert. Nach Auswertung des Überschreitungsdiagrammes (siehe Abbildung 6.3), kann daraus die maximal benötigte Kühl- und Heizleistung abgelesen werden. Sie beträgt für den Kühlfall ca. 4 kW und für den Heizfall ca. 7,3 kW. Im Vergleich mit der Haustechnikberechnung wo von einer maximalen Kühlleistung von 3,4 kW ausgegangen wurde, ist hier eine relativ gute Übereinstimmung anzutreffen. Die benötigte maximale Heizleistung liegt jedoch mit 7,3 kW um 4,6 kW höher als die Berechnung der Norm-Heizlast mit 2,7 kW. Die Überschreitung der Norm-Heizlast von 2,7 kW findet bei genauer Betrachtung jeweils zwischen Stunde 6:00 und 7:00 an kalten Tagen während der Betriebszeit statt. Zu diesen Zeitpunkten wird die Heizung aktiviert. Dadurch, dass die Heizlast nicht limitiert ist, steigt sie zu diesen Zeitpunkten bis zum Wert von 7,3 kW an, um die gewünschte Raumtemperatur zu erreichen. Der Einfluss auf die Energiebilanz ist trotz der großen Differenz bei der maximalen Heizleistung vernachlässigbar klein, da nur für einen sehr kleinen Zeitraum (< 150h) mehr als 2,7 kW benötigt werden.

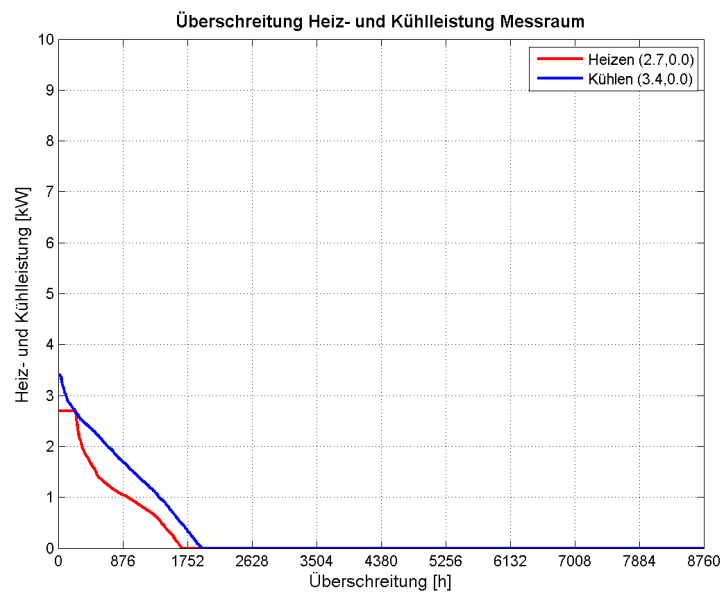


Abbildung 6.2.: Überschreitungsdiagramm des Büroraumes mit Standardfassade (Szenario 1)

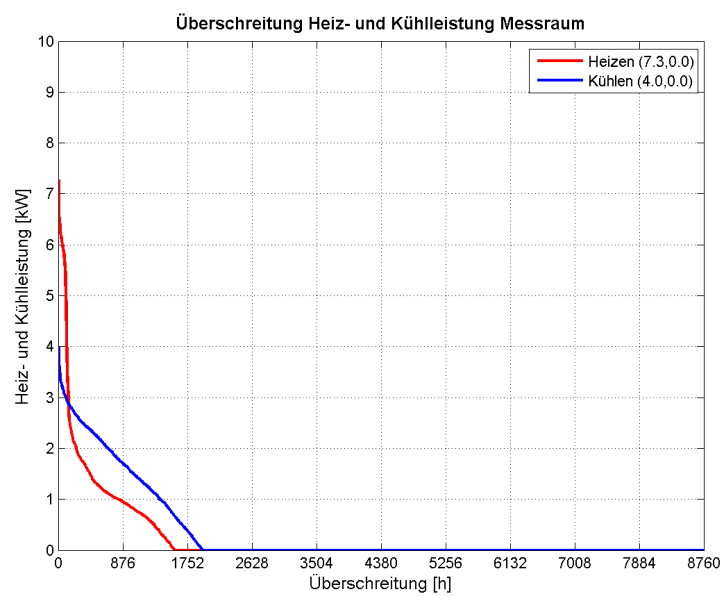


Abbildung 6.3.: Überschreitungsdiagramm bei unlimitierter Kühl- und Heizleistung (Szenario 2)

### 6.1.3. Szenario 3 - altes Strahlungsmodell

Der Einfluss des neuen Strahlungsmodells wurde bereits an einem sehr einfachen Beispiel in Kapitel 2.2.6 untersucht. Um die Auswirkung der Wahl des Strahlungsmodells auf den Büroraum mit Standardfassade zu untersuchen, wird basierend auf der Basisvariante, das alte Strahlungsmodell verwendet. Dazu muss im TRNBuild nur der "Radiation Mode" geändert und eine neue Jahressimulation durchgeführt werden. Da das alte Strahlungsmodell die GeoSurf Faktoren für die Aufteilung der langwelligen Strahlung im Raum verwendet, müssen diese hier noch zusätzlich definiert werden. Die Verteilung der Geosurf Faktoren beruht auf der bereits durchgeführten Untersuchung in Kapitel 2.2.6 und ist in Tabelle 2.1 ersichtlich. Wiederum wird die spezifische Energiebilanz für die Auswertung herangezogen, welche in Abbildung 6.4 zu sehen ist. Durch die Verwendung des alten Strahlungsmodells geht auch die Information über die Gebäudeeigen- und externe Verschattung verloren. Dadurch kommt es zu einem Anstieg des solaren Ertrags auf ca. 297 kWh/m<sup>2</sup>(= 11%). Dieser zusätzliche Wärmeeintrag wird hauptsächlich über erhöhte Kühlung und geringfügig erhöhte Transmission und abgeführt. Zwar ist es möglich in TRNSYS einen Type zum Berücksichtigen der Verschattung einzuführen, jedoch ist dieser Type (Wingwall) sehr umständlich zu konfigurieren und wird

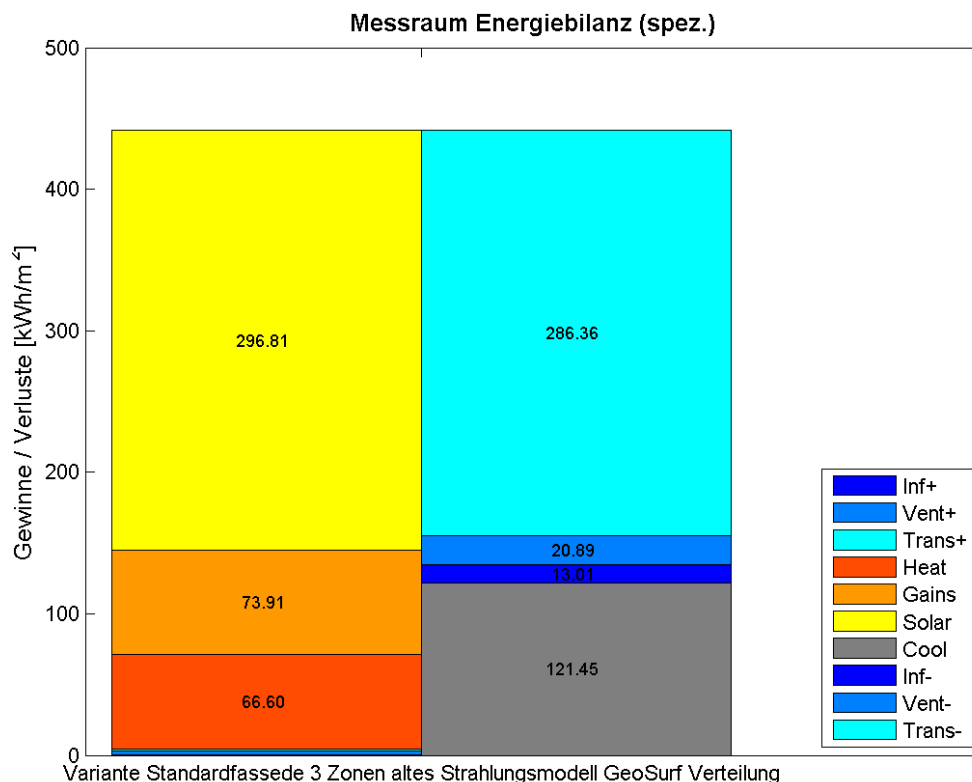


Abbildung 6.4.: Energiebilanz mit altem Strahlungsmodell (Szenario 3)

deshalb kaum verwendet. Um den Einfluss der Gebäudeeigenverschattung generell zu untersuchen wird im folgenden Kapitel ein eigenes Szenario definiert.

#### 6.1.4. Szenario 4 - Vernachlässigung der Gebäudeeigenverschattung

Bei diesem Szenario werden die in der Basisvariante definierten shading elemente (siehe Abbildung 3.6) gelöscht. Somit wird trotz Verwendung des neuen Strahlungsmodells keine externe Verschattung der Raumzone berücksichtigt. Die spezifische Energiebilanz für dieses Szenario ist in Abbildung 6.5 zu sehen. Die Energiebilanz ist annähernd gleich wie die Energiebilanz aus Szenario 3. D.h. dass das neue Strahlungsmodell in diesem Fall hauptsächlich Einfluss auf die externe Verschattung des Gebäudes hat.

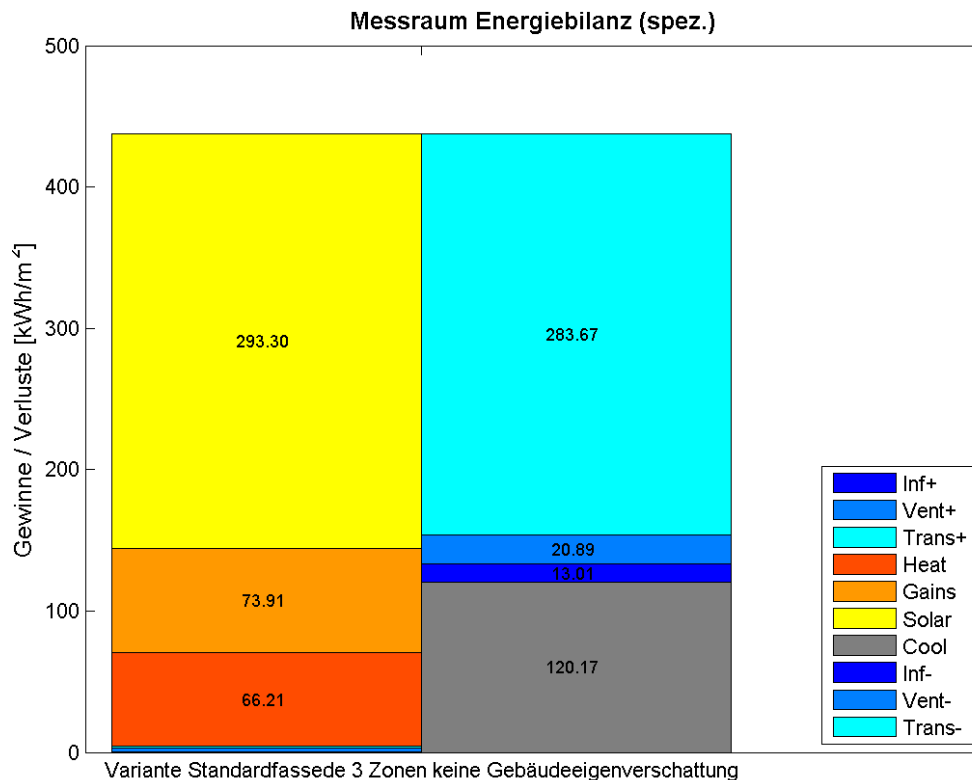


Abbildung 6.5.: Energiebilanz ohne Berücksichtigung der Gebäudeeigenverschattung (Szenario 4)

#### 6.1.5. Szenario 5 - Untersuchung von außen angebrachten Verschattungsvorrichtungen

Wie bereits erwähnt, ist unter anderem ein Grund für den hohen solaren Wärmeeintrag in den Büroraum, die innenliegende Verschattung. Durch die Simulationstechnik



ist es sehr einfach möglich den Unterschied bei außenliegender Verschattung zu untersuchen. Die Regelung der Verschattungselemente basiert auf der Basisvariante. Die spezifische Energiebilanz (Abbildung 6.6) zeigt, dass die solaren Erträge um 1/5 auf ca. 214 kWh/m<sup>2</sup> zurückgehen. Gleichzeitig erhöht sich geringfügig der Heizenergiebedarf. Dies hat natürlich Auswirkungen auf den Kühlbedarf, welcher ebenso um ca. 40 kWh/m<sup>2</sup> sinkt. In diesem Szenario ist somit der Kühlenergiebedarf geringer als der Heizenergiebedarf. Eine zusätzliche Reduzierung des Glasanteils könnte überdies zu einer weiteren Senkung des Kühlbedarfs führen kann.

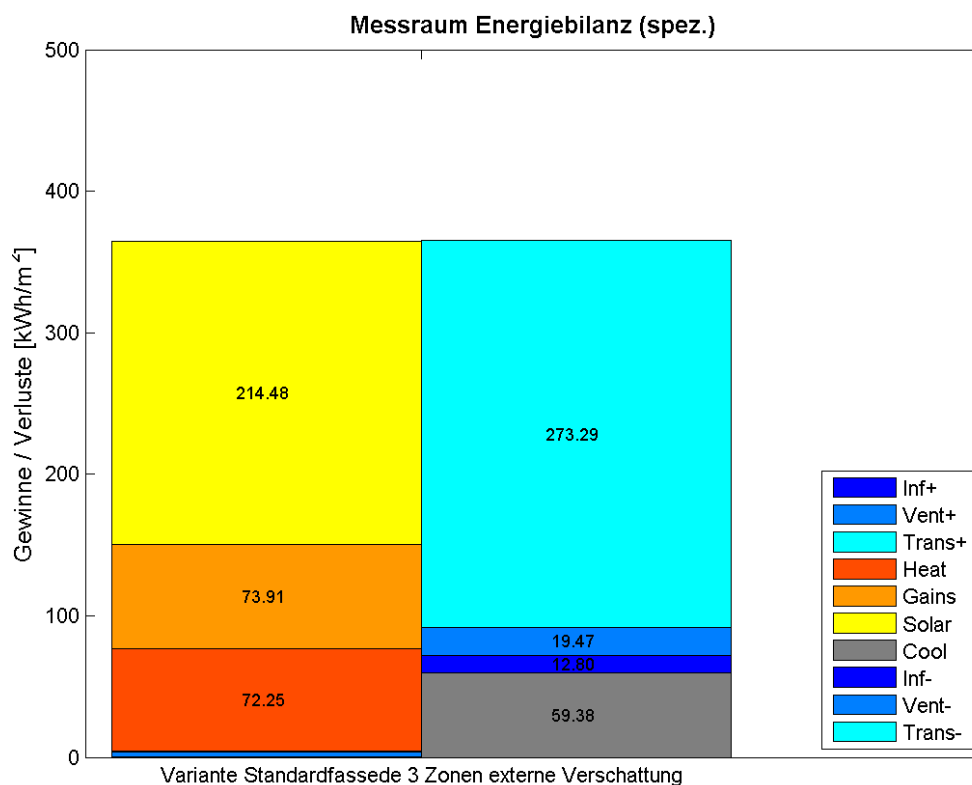


Abbildung 6.6.: Energiebilanz bei außenliegenden Verschattungselementen (Szenario 5)

### 6.1.6. Szenario 6 - Einfluss der Gebäudeausrichtung

Abschließend wird der Einfluss der Gebäudeausrichtung auf die Energiebilanz untersucht. Wie bereits erwähnt ist die Gebäudelängsachse des Fassadenprüfzentrums um 25° Richtung Süd-Ost gedreht (siehe Abbildung 3.3). In diesem Szenario wird die Gebäudelängsachse genau Richtung Süden ausgerichtet um zu sehen, wie groß der Einfluss der Ausrichtung ist. Abbildung 6.7 zeigt, dass durch eine genaue Ausrichtung nach Süden die solaren Erträge sowie der Kühlbedarf geringfügig sinken. Dies liegt an der Sonnenbahn, da diese bei Südausrichtung höher ist als bei Süd-Ost-Ausrichtung und

somit etwas weniger Energie auf die vertikale Fassade auftrifft. Im Vergleich zur Anordnung der Verschattungselementen ist jedoch der Einfluss der Gebäudeausrichtung auf die spezifische Energiebilanz gering.

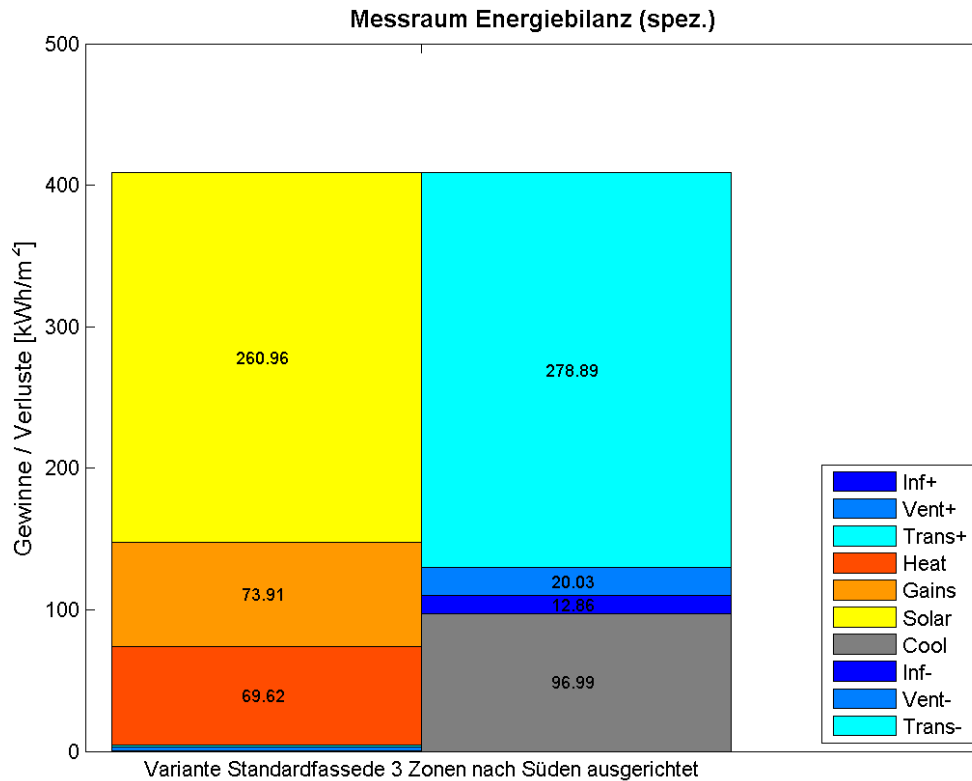


Abbildung 6.7.: Energiebilanz bei Ausrichtung nach Süden (Szenario 6)

## 6.2. Simulationsergebnisse des Büroraumes mit multifunktionaler Fassade

In den folgenden Unterkapiteln werden die Simulationsergebnisse des Büroraumes mit den multifunktionalen Fassadenelementen dargelegt. Als Grundmodell für die Basisvariante mit MPPF-Fassade (Szenario 7), dient die Basisvariante mit Standardfassade (Szenario 1) und die Nutzungsrandbedingungen aus Tabelle 3.7. Der Einfluss der MPPF-Module auf die Simulationskonfiguration wurde bereits in den Kapitel 3, 4, und 5 erläutert. Dort sind auch die durchgeführten Änderungen in den Regelparametern angeführt. Die Auswertung der Energiebilanz wird nach den selben Kriterien wie in Kapitel 6.1 durchgeführt. In einem weiteren Szenario (Szenario 8) wird die Simulation der MPPF-Fassade mit dem alten Strahlungsmodell durchgeführt. Auf weitere Parametervariationen wird hier verzichtet, da diese bereits mit der Standardvariante durchgeführt

wurden und nur geringe Unterschiede aufgezeigt haben. Anstatt dessen wird ein Vergleich der Oberflächentemperaturen an neuralgischen Punkten zwischen MPPF-Fassade und Standardfassade durchgeführt. Dieser Vergleich ist in Kapitel 6.4 zu finden.

### 6.2.1. Szenario 7 - Basisvariante mit MPPF Komponenten

Die Energiebilanz der Basisvariante mit MPPF-Fassade ist in Abbildung 6.8 zu sehen. Es ist zu sehen, dass der Ertrag aus solaren Gewinnen im Vergleich zur Basisvariante mit Standardfassade (Szenario 1) um ca. 14% geringer ist und den Wert 225 kWh/m<sup>2</sup> annimmt. Dies liegt an der Verglasung mit semitransparenter Photovoltaik und an den elektrochromen Gläsern. Diese wirken wie fix installierte Verschattungselemente. Insbesondere die elektrochromen Verglasung reduziert den Ertrag an solaren Gewinnen, da diese als externe Verschattung modelliert wurde. Durch den geringeren solaren Ertrag sinken die benötigte Kühlenergie (merklich um ca. 25%) sowie die Transmissionsverluste um ca. 4%. Nur der Heizenergiebedarf steigt geringfügig an. In Abbildung 6.9 ist das Überschreitungsdiagramm für die Kühl- und Heizleistung für den Büroraum mit MPPF Fassade zu sehen. Im Vergleich zur Standardfassade (Überschreitungsdiagramm Szenario

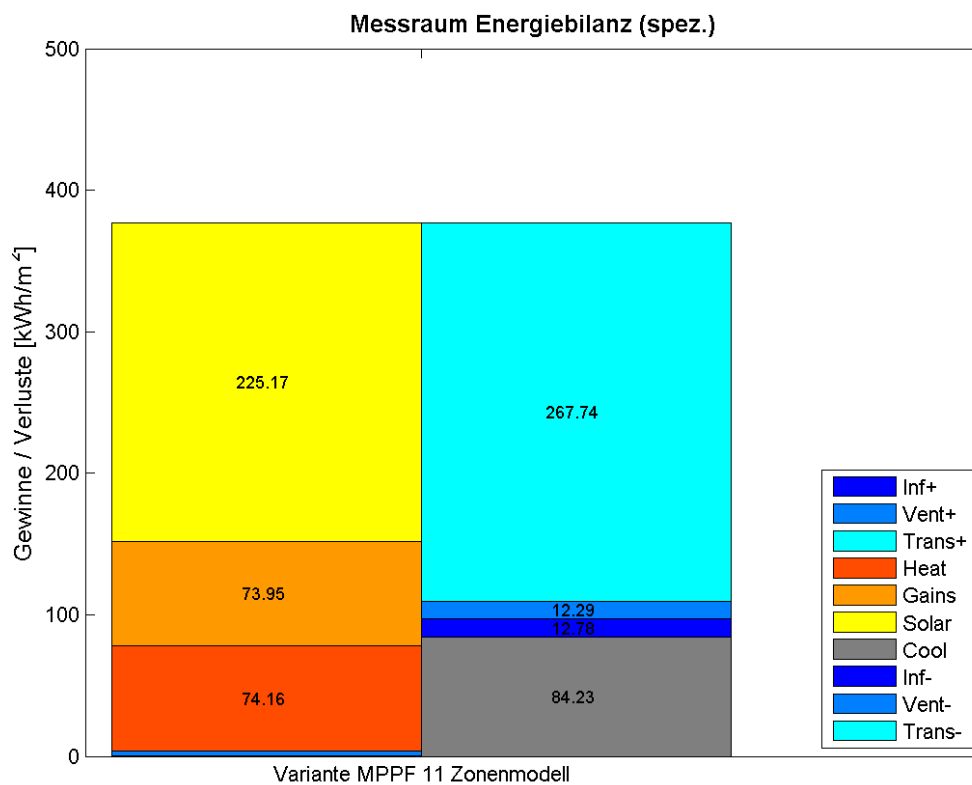


Abbildung 6.8.: Energiebilanz des Büroraumes mit multifunktionaler Fassade (Szenario 7)

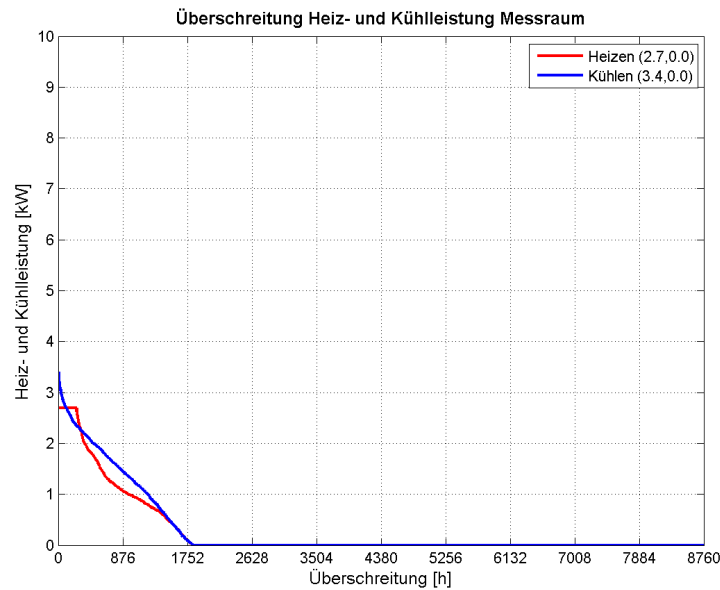


Abbildung 6.9.: Überschreitungsdiagramm des Büroraumes mit MPPF (Szenario 7)

1 siehe 6.2) sinkt die Anzahl der Betriebsstunden für die Kühlanlage von ca. 1940 auf ca. 1830 Stunden. Die Betriebsstunden der Heizungsanlage steigen jedoch von ca. 1670 auf ebenfalls ca. 1830 Stunden an.

Wie bereits bei der Standardfassade muss auch bei MPPF-Fassade die benötigte Energie zur Konditionierung der Zuluft extra erfasst werden. Da in der MPPF Fassade das HLK-Gerät über eine Wärmerückgewinnung verfügt wird in der Energiebilanz die Temperatur des Zuluftstromes nach dem Austritt aus dem Wärmerad anstatt der Umgebungstemperatur für die Erstellung der Energiebilanz verwendet. Die Formel zur Berechnung der zusätzlichen Energie für die Zuluftkonditionierung lautet:

$$Q_{lueftungmppf} = V_{raum} * n_{raum} * \rho_{luft} * c_{luft} * (T_{wrgaus} - T_{amb}) \quad (6.2)$$

Durch die Wärmerückgewinnung sinkt der Heizenergiebedarf zur Zuluftkonditionierung im Vergleich zur Standardfassade ( $22,2 \text{ kWh/m}^2$ ) auf  $8,4 \text{ kWh/m}^2$ . Der Kühlenergiebedarf steigt geringfügig von  $1,1 \text{ kWh/m}^2$  auf  $2,1 \text{ kWh/m}^2$ .

Vergleicht man die beiden Basisvarianten miteinander, so stellt man fest, dass die MPPF-Fassade einen positiven Einfluss auf den Jahresenergiebedarf des dahinterliegenden Büroraumes hat. Diese Aussage gilt erstmals nur für das Simulationsmodell. Um diese Behauptung auf den realen Prototypen übertragen zu können müssen noch weitere Untersuchungen folgen.

### 6.2.2. Szenario 8 - Basisvariante mit MPPF Komponenten mit Standard Strahlungsmodell

In diesem Szenario wird (wie bereits bei Szenario 3) der Einfluss der unterschiedlichen Strahlungsmodelle auf den Jahresenergiebedarf untersucht. Dazu ist in Abbildung 6.10 der Jahresenergiebedarf des Büroraumes mit MPPF-Fassade und altem Strahlungsmodell zu sehen. Ähnlich wie bei Szenario 3 steigt hier der solare Ertrag im Vergleich zum neuen Strahlungsmodell um ca. 11% auf 251 kWh/m<sup>2</sup> an. Dieser Anstieg ist fast ident mit dem Anstieg bei dem Vergleich der Strahlungsmodell mit der Standardfassade und beruht auf der selben Ursache (des Fehlen der Gebäudeeigenverschattung). Dieser erhöhte Ertrag senkt den Heizenergiebedarf kaum, sondern muss durch erhöhte Transmission und erhöhtem Kühlenergiebedarf (=mehr Energie) abgegeben werden.

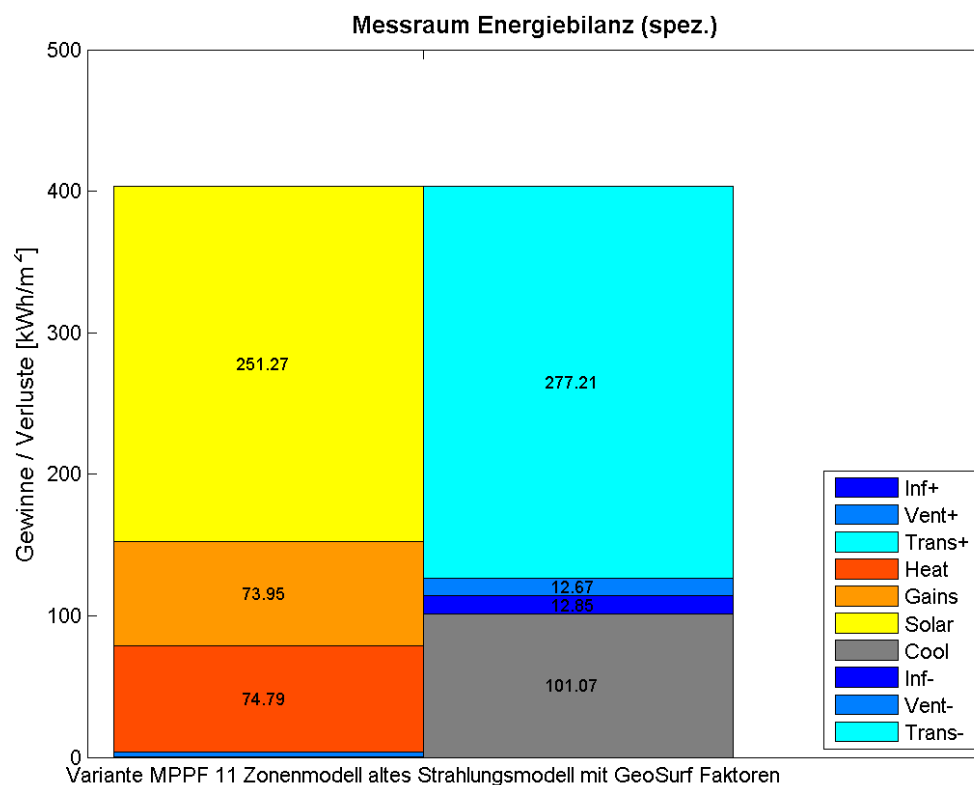


Abbildung 6.10.: Energiebilanz des Büroraumes mit multifunktionaler Fassade und Standard Strahlungsmodell (Szenario 8)

### 6.2.3. Vergleich der Szenarien

Abschließend ist in Tabelle 6.1 ein Vergleich aller Szenarien zu sehen. Dabei werden jeweils nur die maßgeblichen Größen angeführt. Dies sind auf der Gewinnseite die spe-

zifischen solaren Erträge und die spezifische Heizenergie. Auf der Verlustseite werden die spezifischen Transmissionsverluste und die benötigte spezifische Kühlenergie dargestellt. Die internen Gewinne sind für alle Szenarien gleich und werden deshalb nicht angeführt. Die restlichen Werte sind in den Abbildungen 6.1.1 bis 6.2.2 zu finden.

Tabelle 6.1.: Vergleich der Szenarien

kWh/m <sup>2</sup> a		Gewinne		Verluste	
		$Q_{sol}$	$Q_{heat}$	$Q_{trans}$	$Q_{cool}$
Szenario 1	Standard	265,9	68,9	279,2	100,5
Szenario 2	Standard	265,7	72,6	281,1	101,2
Szenario 3	Standard	296,8	66,6	286,3	121,4
Szenario 4	Standard	293,3	66,2	283,7	120,2
Szenario 5	Standard	214,5	72,2	273,3	59,4
Szenario 6	Standard	260,9	69,6	278,9	97,0
Szenario 7	MPPF	225,2	74,2	267,7	84,2
Szenario 8	MPPF	251,3	74,8	277,2	101,0

### 6.3. Vergleich der Oberflächentemperaturen von Standard- und MPPF Fassade

Neben der Jahresenergiebilanz ist auch die thermische Behaglichkeit von hohem Interesse im MPPF-Projekt. Die thermische Behaglichkeit kann maßgeblich von der Temperatur der Raumumschließungsflächen beeinflusst werden. Desweiteren ist die Oberflächentemperatur auch für bauphysikalischen Phänomene (z.B. Kondensation) verantwortlich. Aus diesen Gründen wird die Oberflächentemperatur zwischen der Standard- und der MPPF Fassade an neuralgischen Punkten durchgeführt. Dabei handelt es sich um:

- die Innenoberflächentemperatur der außenluftansaugenden Zone des HLK-Gerätes zum Zeitpunkt der kältesten Außentemperatur
- Die Innenoberflächentemperatur des Kollektormodules an einem heißen Sommertag

#### 6.3.1. Temperaturvergleich 1 - Oberflächentemperatur im Winter

Der erste Temperaturvergleich wird zwischen der Innenoberfläche des (standard) Dämmmoduls der Standardfassade und der Oberflächentemperatur an der Innenseite der HLK-Zone Außenluft durchgeführt. Bei dieser Zone sind die tiefsten Temperaturen des HLK-Gerätes zu erwarten. Abbildung 6.11 zeigt den Temperaturverlauf über 24 Stunden zum Zeitpunkt der kältesten Umgebungstemperatur. Diese (rot gestrichelt) sinkt um ca. 8 Uhr morgens auf das Jahresminimum von ca. -18°C. Von Mitternacht bis 6

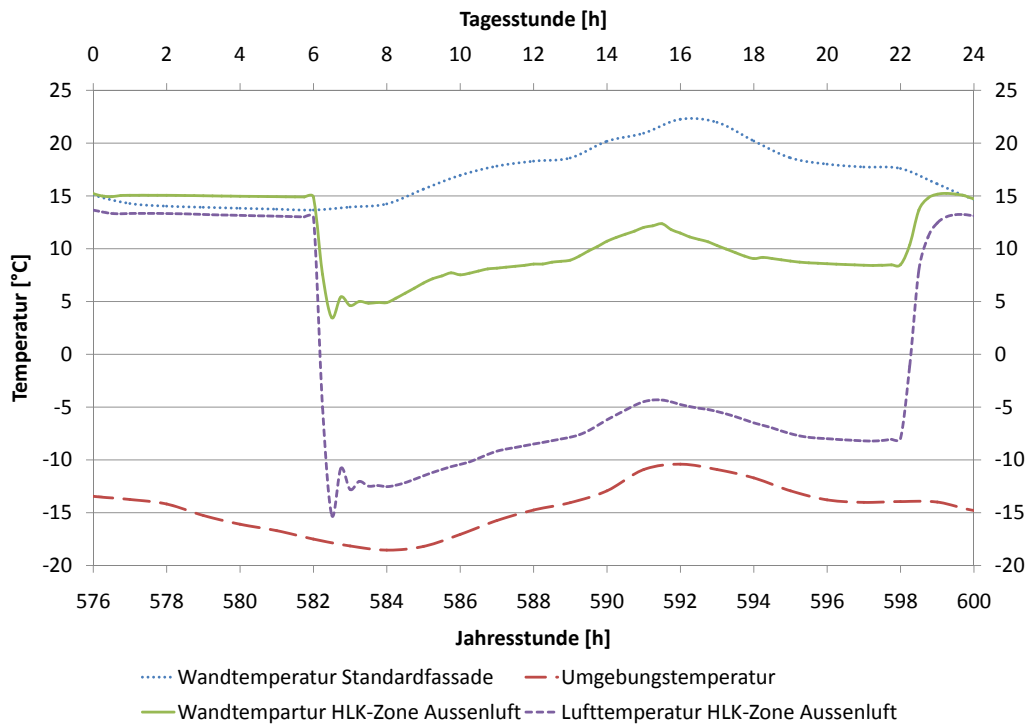


Abbildung 6.11.: Vergleich der Oberflächentemperaturen im Winter

Uhr morgens, erkennt man, dass das Lüftungsgerät ausgeschaltet ist. In dieser Zeit ist sowohl die Oberflächentemperatur als auch die Lufttemperatur in der HLK-Zone Außenluft im Bereich zwischen 13 und 15°C. Im Vergleich dazu hat das Dämmmodul in der Standardfassade eine ähnliche Oberflächentemperatur. Hier sieht man, dass die ruhende Luftschicht im HLK-Gerät relativ gut dämmt, da die Temperatur ähnlich wie bei der Standardfassade gehalten werden kann. Laut den Randbedingungen für die Anlagentechnik geht das HLK-Gerät um 6 Uhr morgens in Betrieb. Man sieht sofort das starke Absinken der Zonen- sowie der Oberflächentemperatur. Man muss sich vorstellen, dass sich zu diesem Zeitpunkt, Luft mit einer Temperatur von ca. -15°C im Wandaufbau befindet. Das hat für die Oberflächentemperatur zum Raum hin zur Folge, dass diese sehr stark auf ca. 4 bis 5°C absinkt. Obwohl die Fläche der HLK-Zone Außenluft sehr gering ist, werden solche niedrigen Oberflächentemperaturen von Benutzern als unbehaglich empfunden und müssen vermieden werden. Zusätzlich rufen diese geringen Temperaturen Kondensation an der Oberfläche hervor. Dies gilt es aufgrund hygienischer und bauphysikalischer Gründe ebenfalls zu verhindern. Im Vergleich dazu erreicht die Oberflächentemperatur des standard Dämmmodules zu diesem Zeitpunkt das Minimum bei ca. 14°C. Diese Temperatur ist hinsichtlich Behaglichkeit und Kondensation noch immer nicht im optimalen Bereich, jedoch im Vergleich zum MPPF-Modul wesentlich besser. Schlussendlich muss angemerkt werden, dass es sich hierbei um eine Simulation handelt, welche noch nicht durch Messungen validiert wurde. Da in der Modellbildung (starke)

Vereinfachungen getroffen wurden, kann sich die tatsächliche Oberflächentemperatur von der hier simulierten mehr oder weniger stark unterscheiden.

### 6.3.2. Temperaturvergleich 2 - Oberflächentemperatur im Sommer

Ist das HLK-Gerät im Winter von Interesse so, gilt dies im Sommer dem thermischen Sonnenkollektor. Wenn der Solarthermische Speicher durchgeladen ist, kann keine weitere Sonnenenergie vom Kollektor abtransportiert werden. D.h. der Kollektor geht in Stagnation und seine Absorbentemperatur steigt aufgrund der andauernden Einstrahlung solange bis die Wärmeverluste des Kollektors an die Umgebung und die eingestrahlte Energie sich das Gleichgewicht halten. Im Stagnationsfall können daher sehr hohe Temperaturen (bis zu  $140^{\circ}\text{C}$ ) am Absorber auftreten. Da in der MPPF-Fassade der Absorber schon Teil des Wandaufbaus ist, hat dies natürlich Auswirkungen auf die Oberflächentemperatur im Inneren des Büroraumes. Abbildung 6.11 zeigt die Oberflächentemperatur im inneren des Raumes an der Stelle des solarthermischen Kollektors im Vergleich zur Oberflächentemperatur an der selben Stelle bei Verwendung des standard Dämmmoduls. Betrachtet man die Umgebungstemperatur so stellt man rasch fest, dass es sich bei diesem Tag um keinen besonders heißen handelt. An diesem Tag in der ersten Septemberwoche geht der Kollektorkreislauf in den Stagnationsfall wie man

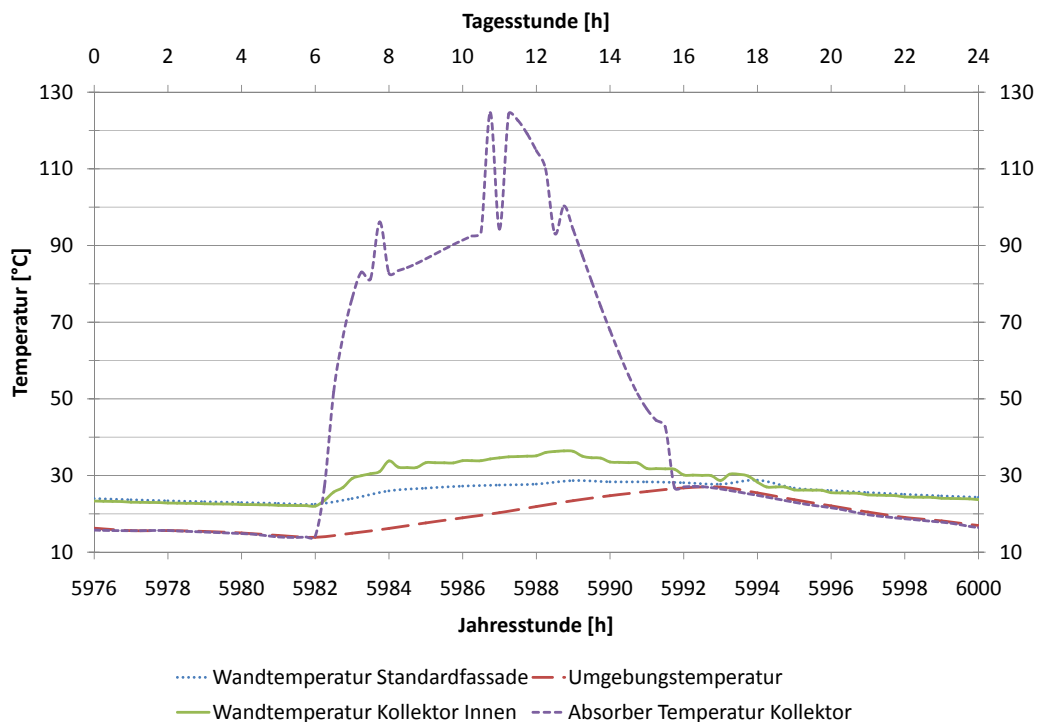


Abbildung 6.12.: Vergleich der Oberflächentemperaturen im Sommer



gut an der Absorbtemperatur sehen kann. Dies hat den Grund, dass im September der Einfallswinkel der Sonnenstrahlung auf einen Fassadenkollektor geringer und somit die Einstrahlung höher als im Hochsommer ist. Generell ist an der Absorbtemperatur zu erkennen, dass nach Sonnenaufgang (kurz nach 6 Uhr) die Temperatur sehr stark ansteigt. Zwischen 7 und 8 Uhr schaltet sich die Kollektorpumpe kurzzeitig ein und aus, um dann von ca. 8 bis kurz vor 11 Uhr durchgehend zu laufen und damit Sonnenenergie in den Wärmespeicher liefert. Kurz vor 11 Uhr ist der Wärmespeicher durchgeladen und die Anlage geht in Stagnation. Dies ist sehr gut an dem auftretendem Peak zu erkennen. Bis auf ein kurzes Einschaltsignal um kurz nach 11 Uhr, sowie um 12.30 bleibt der Kreislauf den restlichen Tag im Stagnationszustand. Der Einfallswinkel der Solarstrahlung auf den Kollektor wird immer schlechter und so sinkt die Absorbtemperatur sehr schnell wieder ab. Ab ca. 16:00 Uhr befindet sich die Sonne bereits auf der Westseite des Gebäudes und der südseitige Kollektor ist somit verschattet. Daher nimmer er die Umgebungstemperatur an.

Die grüne Linie zeigt den dazugehörigen Verlauf der Oberflächentemperatur im Büroraum an der Stelle des thermischen Kollektors. Sie beginnt mit steigender Absorbtemperatur relativ rasch ohne Zeitverzug ebenso anzusteigen bis sie ihr Maximum um ca. 13:00 Uhr mit fast  $37^{\circ}\text{C}$  erreicht. Im Vergleich zur Absorbtemperatur ist maximal ein Zeitverzug von 30 Minuten zu erkennen. Sobald die Absorbtemperatur das Niveau der Umgebungstemperatur angenommen hat, sinkt auch die Oberflächentemperatur ab. Sie ist in diesen Fällen mit der Oberflächentemperatur des standard Dämmmodules fast ident. Das Dämmmodul erreicht an diesem Tag ein Temperaturmaximum von ca.  $28^{\circ}\text{C}$  und liegt somit fast  $10^{\circ}\text{C}$  unterhalb der maximalen Oberflächentemperatur des Kollektors.

### **6.4. Erster Vergleich der Oberflächentemperaturen der MPPF-Fassade zwischen Simulation und Messung**

In diesem Kapitel wird der erste Vergleich zwischen Simulation und Messung der Oberflächentemperatur des Kollektormodules der MPPF-Fassade angeführt. Es werden dafür Messwerte verwendet, die im April (vom 14.04. bis 21.04) am Standort Stallhofen von der dort aufgebauten Messtechnik erfasst wurden. Die Auswertung der Oberflächentemperatur wird nur für einen Tag (19.04.) durchgeführt. Zusätzlich sei angemerkt, dass die messtechnische Erfassung der Wetterdaten unabhängig von der Anlagenmesstechnik ist. Dies hat zur Folge, dass die Messdaten mit unterschiedlichen Zeitschritten aufgezeichnet wurden, bzw. die Absolutzeit der Messwerte nicht übereinstimmen muss.

#### **6.4.1. Wetterdaten**

Wie bereits erwähnt wurde am Standort Stallhofen eine eigene Messtechnik zur Erfassung der Wetterdaten installiert. Diese umfasst die Zeit, Globalstrahlung auf die Ho-

horizontale, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Windrichtung und Windgeschwindigkeit und ist am Dach des Fibag Gebäudes aufgebaut. Die Aufzeichnung erfolgt in 5 Minuten Zeitschritten und kann online ausgelesen werden. Der generierte Wetterdatensatz aus Meteonorm [14] ist aus Stundenwerten aufgebaut. D.h. die gemessenen Wetterdaten werden auf Stundenwerte gemittelt. Dadurch ergibt sich ein leichter Informationsverlust, der jedoch in Kauf genommen wird. Dies ist sehr gut anhand Abbildung 6.13 zu sehen, wo die gemessene Globalstrahlung und die daraus gemittelten Stundenwerte für einen Tag dargestellt sind. Die Wetterdaten werden im gemessenen Zeitraum auf

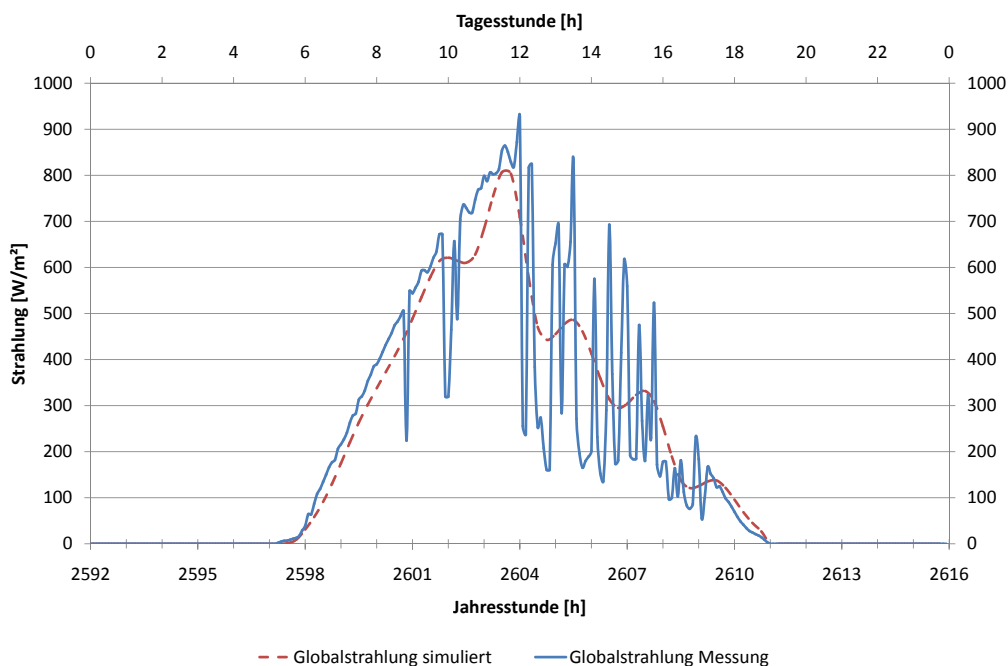


Abbildung 6.13.: Vergleich der gemessenen Globalstrahlung mit dem daraus gemittelten Stundenwerten

Stundenwerte gemittelt um eine TRNSYS Simulation durchführen zu können. Da der Zeitraum von 7 Tagen für eine Simulation relativ gering ist, werden die gemittelten Messwerte in den generierten Wetterdatensatz aus Meteonorm integriert. Anschließend wird wiederum eine Jahressimulation basierend auf Szenario 7 durchgeführt und die Oberflächentemperaturen am Kollektormodul im Messzeitraum ausgewertet.

#### 6.4.2. Messdaten der MPPF-Fassade

In der MPPF Fassade sind sehr viele Messstellen integriert um das Verhalten der Fassade genau untersuchen zu können. Die Aufzeichnung erfolgt in 10 Minuten Zeitschritten. Für diesen ersten einfachen Vergleich werden folgende Messstellen ausgewertet: Die

Absorber- und die raumseitige Oberflächentemperatur des solarthermischen Kollektors (mit Kupferabsorber). Es sei angemerkt, dass die raumseitige Oberflächentemperatur an der Rückwand des Kollektors gemessen wird. Diese Rückwand wird aus optischen Gründen von einem Paneel abgedeckt und ist somit im Büroraum als solche nicht zu erkennen. In der Simulation wurde daher dieses Paneel ebenfalls im Wandaufbau nicht berücksichtigt.

### 6.4.3. Vergleich zwischen Simulation und Messung

In Abbildung 6.14 ist der Vergleich der gemessenen und simulierten Absorbtemperatur ersichtlich. Es ist schon in den Nachtstunden ein Offset von ca. 2 K vorhanden. Die gemessene Temperatur steigt aufgrund der Einstrahlung ab ca. 6:00 Uhr morgens relativ schnell an. Um kurz vor 8:00 Uhr geht die Kollektorpumpe in Betrieb was an dem Abfallen der Absorbtemperatur von ca. 70°C auf 55°C erkennbar ist. Anschließend steigt die Temperatur bei laufendem Pumpbetrieb auf ihr Maximum von 75°C (um ca. 12:00 Uhr) an. Im weiteren Verlauf schwankt die Absorbtemperatur, aufgrund sehr starker Unterschiede in der Einstrahlung (Vergleiche mit Abbildung 6.13). Kurz nach 14:00 Uhr wird die Kollektorpumpe abgeschaltet und die Absorbtemperatur nähert sich langsam der Umgebungstemperatur an. Die simulierte Absorbtemperatur steigt

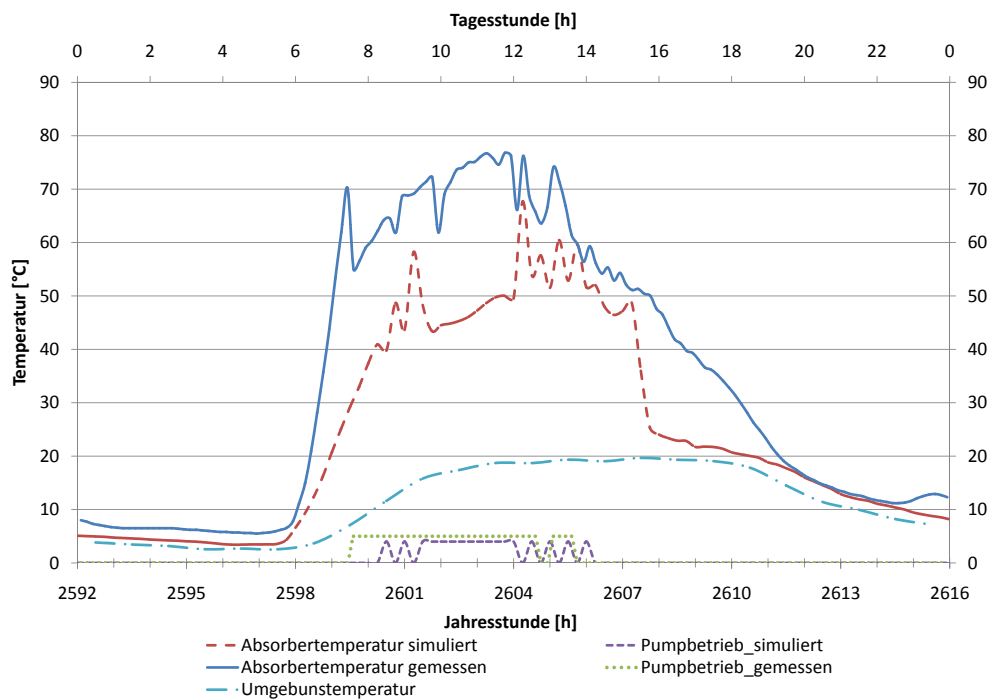


Abbildung 6.14.: Vergleich der gemessenen und simulierten Absorbtemperatur

in Relation dazu etwas geringer auf ca. 40°C, bis sich die Anlage zwischen 8:00 und

10:00 Uhr morgens zweimal Ein- und Ausschaltet. Ab ca. 10:00 bis 12:00 Uhr läuft die Pumpe durch und der Absorber erreicht ein Temperaturniveau von ca.  $50^{\circ}\text{C}$ . Dies ist im Vergleich zur Messung um ca. 25 bis 30 K weniger. Anschließend sind bis ca. 15:00 Uhr mehrere Peaks zu erkennen die hauptsächlich vom Ein- und Ausschalten der Kollektorpumpe abhängen. Das starke Abfallen der Absorbtemperatur ab ca. 15:00 Uhr kann daran liegen, dass der Fassadenkollektor ab diesem Zeit vom Gebäude verschattet wird. Jedoch ist das starke Absinken in der Messung nicht zu finden und muss in weitere Folge hinterfragt werden. Ein möglicher Grund kann eine zu geringe Kapazität des Kollektors sein. Nach dem Abfallen der simulierten Absorbtemperatur nähert sich diese der Umgebungstemperatur an.

In Abbildung 6.15 werden die simulierte und gemessene raumseitige Oberflächentemperatur des Kollektors miteinander verglichen. Obwohl die simulierte Absorbtemperatur deutlich geringer ist, führt dies an der Innenoberfläche zu höheren Wandtemperaturen. Es ist jedoch bereits in den Nachtstunden ein Unterschied von ca. 5 K ersichtlich. Ein

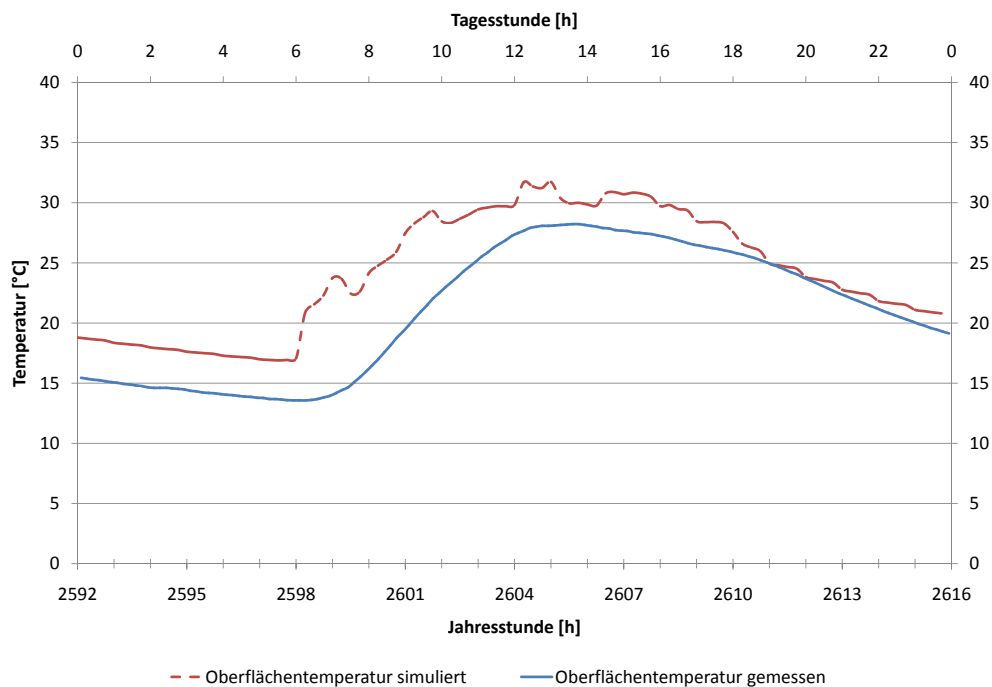


Abbildung 6.15.: Vergleich der gemessenen und simulierten Oberflächentemperatur an der Kollektorinnenseite

möglicher Grund hierfür kann die unterschiedliche Konditionierung des Raumes in den Nachtstunden sein. Im Vergleich zur Messung erfolgt das Ansteigen der Wandtemperaturen annähernd zeitgleich mit dem Ansteigen der Absorbtemperatur. Der starke Anstieg der simulierten Wandtemperatur ab 6:00 Uhr kann daran liegen, dass zeitgleich die Heizung in Betrieb geht. Die weiteren kleinen Peaks in der Simulation sind nicht

jedoch nicht wirklich nachvollziehbar. Die gemessene Wandtemperatur beginnt erst mit einem Zeitverzug von etwa 30 Minuten anzusteigen. Wie in Abbildung 6.14 zu sehen, befindet sich die gemessene Absorbtemperatur zwischen 9:00 und 14:00 im Bereich von ca.  $70^{\circ}\text{C}$ . Dies hat für die Wandtemperatur zur Folge, dass das Maximum kurz nach 13:00 Uhr mit ca.  $28^{\circ}\text{C}$  erreicht wird. Ein ähnliches Verhalten zwischen Absorbtemperatur und Wandtemperatur ist bei der Simulation nur schwer zu erkennen. Jedoch ist ein ähnliches Verhalten beim Temperaturanstieg, bzw. bei Temperaturabfall am Vor- und Nachmittag im Bezug auf die jeweilige Steigung ablesbar. Um einen aussagekräftigen Vergleich zwischen Messung und Simulation machen zu können, ist jedoch noch viel Arbeit notwendig. Speziell der Kollektorkreis unterscheidet sich in der Modellierung stark vom tatsächlichen. Diese Problemstellungen gilt es in der weiteren Laufzeit des Projektes MPPF zu lösen.

## 7. Zusammenfassung

Diese Arbeit zeigt Ansätze und Ideen für die detaillierte thermische Modellierung eines Büroraumes mit multifunktionaler Fassade. Es wurden die einzelnen Problemstellungen beleuchtet und erste Lösungsansätze aufgezeigt. Durch die Verwendung der neuen TRN-SYS Version ist es möglich externe Verschattung durch das eigene oder Nachbargebäude mit Hilfe des dreidimensionalen Strahlungsmodells einfach zu realisieren. Im weiteren Verlauf des Projektes müssen die einzelnen Modelle auf ihre Plausibilität überprüft und dementsprechend verbessert werden. Insbesondere der Kollektorkreislauf muss detaillierter dargestellt werden, da er in Form der Absorbertemperatur einen wichtigen Eingabeparameter für die Gebäudesimulation berechnet. Gleiches gilt für das HLK-Gerät. Hier ist es zusätzlich notwendig ein Messkonzept zu erstellen um künftig einen Vergleich zwischen Messung und Simulation durchführen zu können. Im folgenden Ausblick ist eine detaillierte Aufstellung der wichtigsten Punkte für die künftige Weiterentwicklung des Simulationsmodells.

Obwohl schon eine Vielzahl an Randbedingungen gesammelt wurden, ist es für einen Vergleich zwischen Messung und Simulation notwendig, die tatsächlichen Randbedingungen (Klimadaten, Nutzungsprofile) im Vergleichszeitraum zu erfassen. Wichtige Regelparameter (Verschattungssteuerung, Kunstlichtsteuerung), die aufgrund fehlender Messung oder Informationen noch angenommen werden, müssen in das derzeitige Messkonzept aufgenommen, oder in Erfahrung gebracht werden.

Die ersten Ergebnisse des noch nicht validierten Simulationsmodells haben gezeigt, dass mit Hilfe der MPPF-Fassade der Jahresenergiebedarf im Vergleich zur Standardfassade geringfügig gesenkt werden kann. Grund hierfür ist im wesentlichen der geringere solare Eintrag in den Büroraum aufgrund der geänderten Verschattungselemente (semitransparenten PV und elektrochromen Verglasung). Dieses Ergebnis gilt jedoch nur unter eigens dafür definierten Randbedingungen. Der Vergleich zwischen Standard und MPPF-Fassade hat gezeigt, dass der Einfluss auf die Oberflächentemperatur hinter den MPPF-Modulen ein wichtiger Punkt ist, der in weitere Folge betrachtet werden muss.

Das Ziel der Fassadenentwicklung muss unter Anderem darin liegen, in der MPPF Fassade gleichwertige oder sogar behaglichere Oberflächentemperaturen der Fassadeninnenseite im Vergleich zu einer konventionellen Fassade zu erreichen.

Erste Paramaterstudien für die weitere Entwicklung von MPPF-Modulen, können bereits jetzt, speziell aber nach der Validierung mit Messdaten, mit dem derzeitigen Simulationsmodell durchgeführt werden.

## 8. Ausblick

Für die Weiterentwicklung des Simulationsmodells sind folgende Punkte zu beachten.

- Derzeit wird in der Modellbildung der Grundriss vereinfacht, um das konvexe Kriterium für das 3D Strahlungsmodell zu erfüllen. Der Einfluss dieser Vereinfachung wurde bisher noch nicht untersucht. Ein Ansatz ist die Verwendung des korrekten Grundrisses mit Hilfe einer Unterteilung in der Form eines "No-Window". Laut letzten Meldungen seitens TRNSYS wird aber daran gearbeitet, um das neue Strahlungsmodell auch bei konkaver Geometrie verwenden zu können.
- Der Einfluss, ob bei der Erstellung der Gebäudegeometrie die Innen- oder Außenabmessungen verwendet werden.
- Durch die Modellierung des Kollektors als eigene Raumzone ist es möglich das Mikroklima im Kollektor zu beeinflussen. Derzeit wird nur ein konstanter Luftwechsel von  $0,1 \text{ h}^{-1}$  angenommen. Weiterführende Informationen hierzu sind im IAE SHC Task 10 zu finden [8].
- Der Kollektorkreislauf muss an die tatsächlichen Rahmenbedingungen am Standard Stallhofen angepasst werden. Dazu ist es notwendig, die Wirkungsgradkennlinie beider Kollektortypen in Erfahrung zu bringen. Desweiteren muss der thermische Warmwasserspeicher detaillierter abgebildet werden.
- Beim HLK-Gerät wird aktuell nur die Wärmerückgewinnung berücksichtigt. In weiterer Folge sollte die Feuchterückgewinnung mitmodelliert werden. Außerdem wird die Betriebsweise nur für den Winterfall untersucht. Künftig wird es notwendig sein, das HLK-Gerät durch eine detaillierte Anlagensimulation abzubilden (eventuell durch die Entwicklung eines eigenen Types). Ziel ist es, dass Gerät für Heiz- und Kühlzwecke in die Gebäudesimulation einzubinden. Dazu ist die Kopplung zwischen HLK-Gerät und Warmwasserspeicher (bzw. Kollektorkreislauf) herzustellen, da der Speicher als Wärmequelle dienen soll. Diese Verknüpfung muss nach dem Konzept Vorort ins Modell implementiert werden.
- Das starke Abfallen der simulierten Absorbtemperatur kann an eine zu geringen Kollektorkapazität liegen. Dies muss in weiterer Folge untersucht werden.
- Für die Steuerung der Verschattungselemente empfiehlt sich künftig die Verwendung eines Tageslichtsimulationsprogrammes. Ebenso ist es notwendig die Regelparameter vor Ort aus der installierten Gebäudesteuerung ausfindig zu machen. Eine Anfrage an die verantwortliche Firma wurde bisher noch nicht beantwortet.

- Die in die in die Verglasung integrierten PV-Paneele erwärmen sich bei auftreffender Solarstrahlung. Das Ausmaß dieser Erwärmung muss vor Ort erfasst und mit geeigneten Methoden ins Simulationsmodell integriert werden.



# Abbildungsverzeichnis

1.1.	Energetischer Endenergieverbrauch in Ö 2008 . . . . .	1
1.2.	Anteil der unterschiedlichen Ressourcen für die Bereitstellung des Endenergieverbrauchs in Ö 2008 . . . . .	2
2.1.	Modularer Aufbau in TRNSYS . . . . .	7
2.2.	Einflussgrößen im Zonenmodell . . . . .	8
2.3.	Aufteilung der Hemisphäre in Patches [20] . . . . .	10
2.4.	Modell für die Erzeugung der View Faktor Matrix [20] . . . . .	11
2.5.	Vergleich Convex-Concave [20] . . . . .	11
2.6.	Raumzone mit mehreren Luftknoten [20] . . . . .	13
2.7.	Vereinfachte Raumgeometrie zur Untersuchung des neuen und alten Strahlungsmodells. . . . .	15
2.8.	Vergleich der absorbierten Strahlungsenergie bei neuem und altem Strahlungsmodell . . . . .	16
2.9.	Vergleich des Heiz- und Kühlenergiebedarf der beiden Strahlungsmodelle . . . . .	17
3.1.	Südfassade mit Schnittdarstellung in Standardausführung . . . . .	19
3.2.	Fotos des Fassadenprüfzentrums . . . . .	20
3.3.	Grundriss des Büroraumes . . . . .	21
3.4.	Einfaches Google SketchUp 3-Zonen-Modell des Büroraumes . . . . .	23
3.5.	Vergleich der Fassadenflächen . . . . .	23
3.6.	Gebäudeeigenverschattung . . . . .	28
3.7.	Erste Idee der Modellbildung . . . . .	30
3.8.	11 Zonen SketchUp Modell der Fassade mit allen MPPF Modulen. . . . .	32
3.9.	Schematischer Kollektoraufbau der beiden unterschiedlichen Kollektortypen [29] . . . . .	33
3.10.	Kollektormodelle . . . . .	34
3.11.	TRNBuild Parameter für den Wandaufbau des Kollektormoduls. . . . .	35
3.12.	Berechnete Temperaturen aus dem Programm Kolektor 2.2 [13] . . . . .	36
3.13.	Unterschiedliche Photovoltaikmodule . . . . .	38
3.14.	Das dezentrale Fassadenlüftungsgerät [10] . . . . .	40
3.15.	Zonenmodell des dezentralen Raumlüftungsgerätes . . . . .	41
3.16.	Struktur eines elektrochromen Verbundglases ([11]) . . . . .	43
3.17.	Aufbau der elektrochromen Verbundglasscheibe ([11]) . . . . .	44
4.1.	Hydraulikschema [29] . . . . .	46

4.2. Schema eines Wärmeübertragers . . . . .	48
5.1. Aufbau der Jahressimulation . . . . .	50
5.2. Trnsys Aufbau des Kollektorkreislaufes . . . . .	52
6.1. Energiebilanz des Büroraumes mit Standardfassade (Szenario 1) . . . . .	56
6.2. Überschreitungsdiagramm des Büroraumes mit Standardfassade (Szenario 1) . . . . .	57
6.3. Überschreitungsdiagramm bei unlimitierter Kühl- und Heizleistung (Szenario 2) . . . . .	57
6.4. Energiebilanz mit altem Strahlungsmodell (Szenario 3) . . . . .	58
6.5. Energiebilanz ohne Berücksichtigung der Gebäudeeigenverschattung (Szenario 4) . . . . .	59
6.6. Energiebilanz bei außenliegenden Verschattungselementen (Szenario 5) . . . . .	60
6.7. Energiebilanz bei Ausrichtung nach Süden (Szenario 6) . . . . .	61
6.8. Energiebilanz des Büroraumes mit multifunktionaler Fassade (Szenario 7) . . . . .	62
6.9. Überschreitungsdiagramm des Büroraumes mit MPPF (Szenario 7) . . . . .	63
6.10. Energiebilanz des Büroraumes mit multifunktionaler Fassade und Standard Strahlungsmodell (Szenario 8) . . . . .	64
6.11. Vergleich der Oberflächentemperaturen im Winter . . . . .	66
6.12. Vergleich der Oberflächentemperaturen im Sommer . . . . .	67
6.13. Vergleich der gemessenen Globalstrahlung mit dem daraus gemittelten Stundenwerten . . . . .	69
6.14. Vergleich der gemessenen und simulierten Absorbtemperatur . . . . .	70
6.15. Vergleich der gemessenen und simulierten Oberflächentemperatur an der Kollektorinnenseite . . . . .	71
A.1. Aufbau der Shading Matrix (*.shm) . . . . .	82
A.2. Aufbau der Insulation Matrix (*.ism) . . . . .	83
A.3. Aufbau der View Faktor Matrix (*.vfm) . . . . .	83
A.4. Eingabeparameter für Kollektor . . . . .	84
A.5. Eingabeparameter für Absorber . . . . .	85
A.6. Glasparameter . . . . .	86
A.7. Glasparameter und Ergebnis . . . . .	87
A.8. Betriebszustände Fassadenlüftungsgerät . . . . .	88

# Tabellenverzeichnis

2.1. Verteilung der Geosurf- Faktoren . . . . .	16
3.1. Aufteilung der MPPF-Module . . . . .	20
3.2. Übersicht der verbauten Massen der Fassade in Standardausführung . .	22
3.3. U-Wertberechnung des Fassadenausschnittes [23], [5] . . . . .	25
3.4. Materialzusammensetzung der äquivalenten Fassade . . . . .	26
3.5. Wandaufbauten des 3-Zonen-Modells in Standardausführung . . . . .	27
3.6. Berechnung der Raumkapazität . . . . .	27
3.7. Nutzungsrandbedingung für die Gebäudesimulation . . . . .	31
3.8. Wandaufbau des Kollektors mit Kupferabsorber . . . . .	34
3.9. Temperaturverlauf im Kollektor in °C . . . . .	37
3.10. Wandaufbau des polykristallinen PV-Paneels . . . . .	39
3.11. Eigenschaften des elektrochromen Glasmodules mit 2-fach Isolierglas ([11])	43
6.1. Vergleich der Szenarien . . . . .	65

# Literaturverzeichnis

- [1] BLÜMEL, E. ; SUMANN, M. ; FINK, C. ; HEIMRATH, R. ; PUSCHNIG, P. : COOLSAN Kältetechnische Sanierungskonzepte für Büro- und Verwaltungsgebäude / AEE INTEC Arbeitsgemeinschaft ERNEUERBARE ENERGIE Institut für Nachhaltige Technologien A-8200 Gleisdorf, Feldgasse 19. 2005. – Forschungsbericht 29
- [2] CLARKE, J. A.: *Energy Simulation in Building Design - Second Edition*. Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX28DP, 225 Wildwoow Avenue, Woburn, MA 01801-2041 : Butterworth-Heinemann, 2001 6, 8
- [3] CRESNIK, G. ; MAYDL, P. : Annexbericht: Integration kreislaufwirtschaftlicher Gesichtspunkten in die Entwicklung von MPPF, Bewertung der Fassade des Fibag-Gebäudes / Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie. 2010. – Forschungsbericht 21, 22
- [4] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN V 18599-4:2007-02 Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 4: Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung. Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, Deutschland, 2007. – Vornorm 29
- [5] FRIEDL, B. : Wirtschaftliche und energetische Betrachtung von Fassadensystemen / Karl-Franzens-Universität Graz. Graz, 2009. – Masterarbeit 24, 25, 38, 78
- [6] HEIMRATH, R. : *Simulation, Optimierung und Vergleich solarthermischer Anlagen zur Raumwärmeversorgung für Mehrfamilienhäuser*, Technische Universität Graz, Institut für Wärmetechnik, Diss., 2004 7, 8
- [7] HEINRICH, G. ; FRANZKE, U. : *Wärmerückgewinnung in Lüftungstechnischen Anlagen. Verfahren zur Energieeinsparung beim Heizen und Kühlen*. C. F. Müller, 1993 48
- [8] HOLCK, O. : Compilation of publication and results from project C2: Modelling of microclimate in collectors. / IEA Solar Heating and Cooling Programme. 1999. – Forschungsbericht 74
- [9] LIEBEL, G. ; SCHUSTER, M. ; VOGL, B. ; JANK, W. ; WURM, R. ; STANGL, M. ; SCHANTL, S. ; GREUTTER, G. ; KOLLER-KREIMEL, V. ; BACH, H. : Erneuerbare Energie 2020 - Potenziale und Verwendung in Österreich / Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Version:2009. <http://www.energiestrategie.at/daten-fakten>. – Forschungsbericht 2

- [10] LTG: *Fassadenlüftungsgerät Typ Raumklimatisierung FVM*. [http://www.ltg-ag.de/fileadmin/\\_temp\\_/downloads/dokumentationen/raumluftechnik/luft-wasser-systeme/dezentrale\\_lueftung/LTG-FVM-D-TP\\_416-116.pdf](http://www.ltg-ag.de/fileadmin/_temp_/downloads/dokumentationen/raumluftechnik/luft-wasser-systeme/dezentrale_lueftung/LTG-FVM-D-TP_416-116.pdf).  
Version: Jul. 2010 39, 40, 76
- [11] MACH, T. ; SCHRANZHOFER, H. ; RENNHOFFER, M. ; STREICHER, W. ; MUELLER, M. J.: Annexbericht: Der REALE Prototyp im zweiten Projektjahr / MPPF Multifunctional Plug & Play Facade. Graz, Austria, 2010. – Forschungsbericht 42, 43, 44, 76, 78
- [12] MALKAWI, A. M. ; AUGENBROE, G. : *Advanced Building Simulation*. 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxfordshire OX14 4RN : Spon Press, 2003 6
- [13] MATUSKA, T. ; VLADIMIR, Z. : *Kolektor 2.2 reference handbook*. 2009 36, 76
- [14] METEOTEST: *Meteonorm V4*. <http://www.meteonorm.com>, 2002 13, 51, 69
- [15] MITALAS, G. ; STEPHENSON, D. : Calculation of Heat Conduction Transfer Functions for Multi-Layer Slabs. In: *ASHRAE Transactions* 77 (1971), Nr. 2, S. 117–126 8
- [16] MÜLLER, A. : *Hat Heizen Zukunft? Entwicklung des Wärmebedarfes im österreichischen Gebäudebestand bis 2050*. Version: Sept. 2009. <http://www.tmw.at/default.asp?id=2843&al=Deutsch> 2
- [17] PUSCHNIG, P. : Verringerung des Energieeinsatzes im Haus der Zukunft durch Nutzung innovativer Informationstechnologien / Institut für Wärmetechnik. Version: Sept. 2003. <http://www.hausderzukunft.at/results.html/id2823>. – Endbericht 6, 7, 8, 12, 14
- [18] SCHRANZHOFER, H. ; STREICHER, W. ; MACH, T. ; MUELLER, M. J.: MPPF. Bad Staffelstein, 2009 3
- [19] SINNESBICHLER, H. ; KOLLER, A. : Studie zur Energieeffizienz innovativer Gebäude-, Beleuchtungs- und Raumklimakonzepte (EnEff-Studie) / Fraunhofer Insitut für Bauphysik, Nobelstraße 12, D-70569 Stuttgart. Version: 2009. <http://www.ibp.fhg.de/literatur/index.html>. – Forschungsbericht 29
- [20] SOLAR ENERGY LABORATORY: TRNSYS 17, A Transient System Simulation Program, V 17.0. University of Wisconsin-Madison, USA, 2009 6, 10, 11, 13, 35, 51, 76
- [21] STATISTIK AUSTRIA: *Gesamtenergiebilanz*. [http://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/energie\\_und\\_umwelt/energie/energiebilanzen/index.html](http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_und_umwelt/energie/energiebilanzen/index.html).  
Version: 2009 1, 2
- [22] ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSMINISTERIUM: ÖNORM EN 12975-2 Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile, Teil 2: Prüfverfahren. Heinestraße 38, 1020 Wien, 2006. – Norm 37, 46

- [23] ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT: ÖNORM EN 13947 Waermetechnisches Verhalten von Vorhangfassaden - Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten. Heinestraße 38, 1020 Wien, 2007. – Norm 22, 24, 25, 78
- [24] STREICHER, W. : *Sonnenenergienutzung*. Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz, 2009 37
- [25] STREICHER, W. ; MUELLER, M. J.: Multifunctional Plug & Play Facade (MPPF) K-Projekt (Comet Programm). Graz, Österreich, Mai 2008 3
- [26] STREICHER, W. ; MUELLER, M. J.: Multifunktionelle Plug & Play Fassade (MPPF) / K-Projekt (Comet Programm). In: *Erneuerbare Energie - Zeitschrift für eine nachhaltige Energiezukunft* 2009 (2009), Nr. 2, S. 18 – 21 3
- [27] TRANSOLAR: Einführung in die Arbeit mit TRNSYS. Teil 2 Gebäudesimulation / Transsolar Energietechnik. Curiestraße 2, 70563 Stuttgart, 2006. – Schulungsunterlagen 29
- [28] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume - VDI 2078 / VDI Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung. Graf-Recke-Straße 84, 4000 Düsseldorf, Deutschland, 1990. – VDI Richtlinie 29
- [29] ZAUNER, C. ; STERRER, R. ; GOSZTONYI, S. ; SCHRANZHOFER, H. ; MACH, T. ; STREICHER, W. ; LUTSCHOUNIG, K. ; HOCHREITER, E. ; GUGGENBERGER, W. ; WASCHER, H. ; MUELLER, M. J. ; WOLF, M. : Verhalten innovativer Solarthermischer Fassadenkollektoren im Rahmen des Forschungsprojektes MPPF. Bad Staffelstein, Mai 2010 33, 45, 46, 76

# A. Anhang

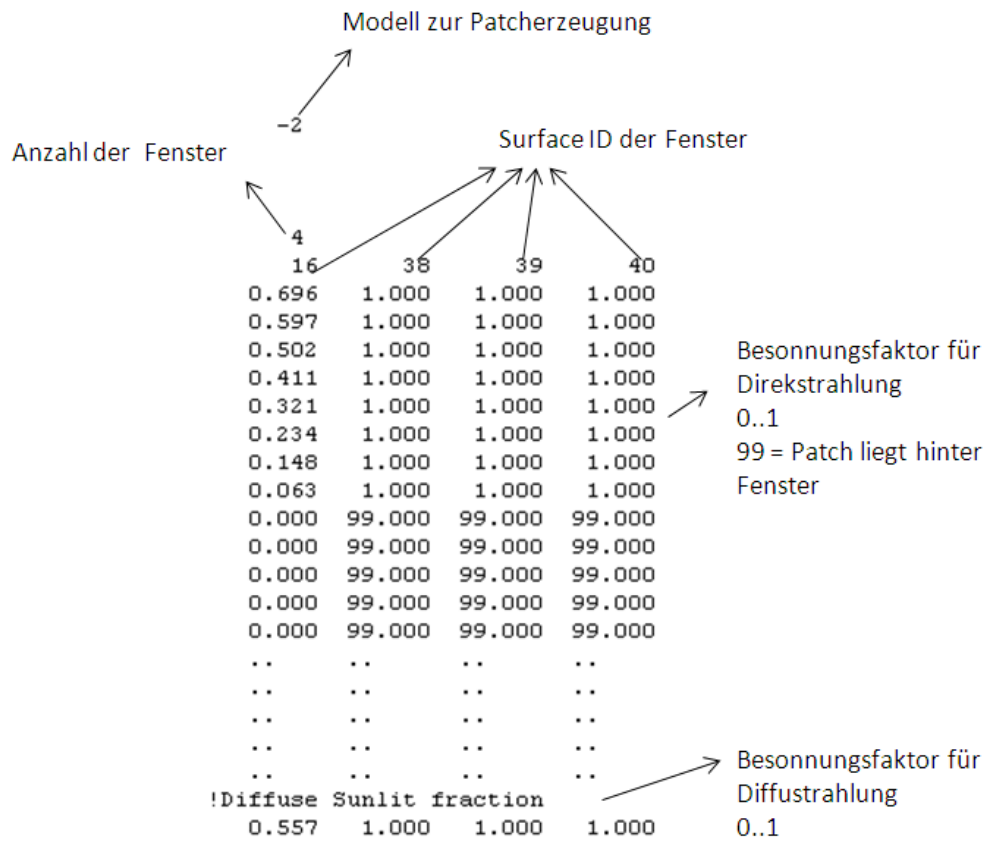


Abbildung A.1.: Aufbau der Shading Matrix (\*.shm)

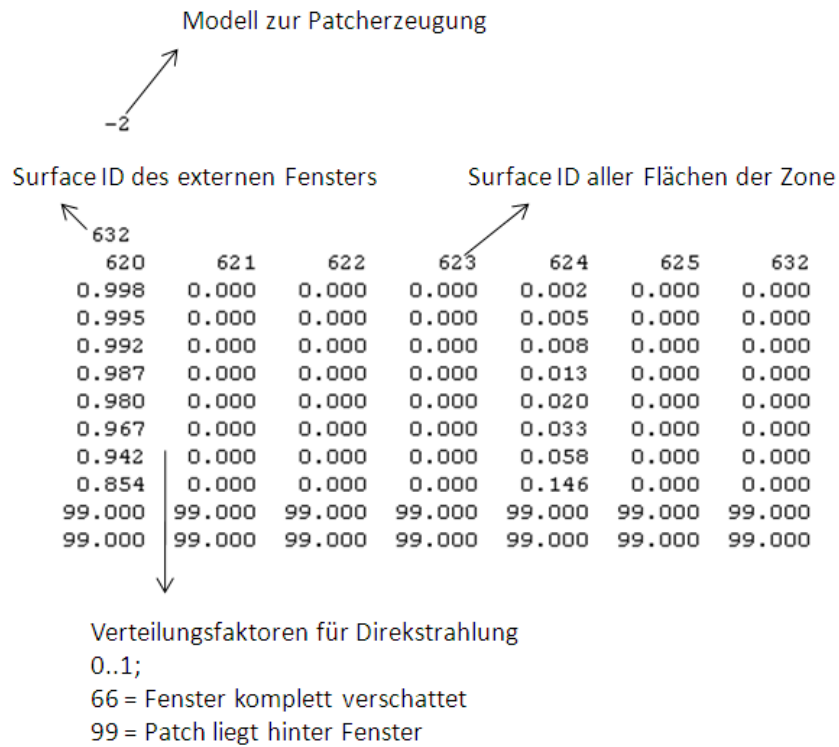


Abbildung A.2.: Aufbau der Insulation Matrix (\*.ism)

Zonen ID und Name

↑

```

4 !KOLLEKTOR_2
620 621 622 623 624 625 632 !surface id's
0.000000000000 0.000824417213 0.003366605151 0.000824417213 0.003366234922 0.027149371388 0.964468954111
0.492964097771 0.000000000000 0.006971493772 0.000128816719 0.006971493843 0.382620266818 0.110343831076
0.496873669474 0.001720724741 0.000000000000 0.001720724739 0.002865853295 0.382118739317 0.114700288433
0.492964097774 0.000128816719 0.006971493766 0.000000000000 0.006971493843 0.382620266820 0.110343831076
0.496819027692 0.001720724758 0.002865853295 0.001720724758 0.000000000000 0.382156524761 0.114717144735
0.807835728249 0.019039827460 0.077038499476 0.019039827460 0.077046117354 0.000000000000 0.000000000000
0.998009601514 0.000190952912 0.000804187240 0.000190952912 0.000804305423 0.000000000000 0.000000000000
    
```

Sichtfaktoren der Fläche untereinander

Abbildung A.3.: Aufbau der View Faktor Matrix (\*.vfm)

Im folgenden sind die Eingabeparameter für das Kollektorsimulationsprogramm Kolektor 2.2 dargestellt.



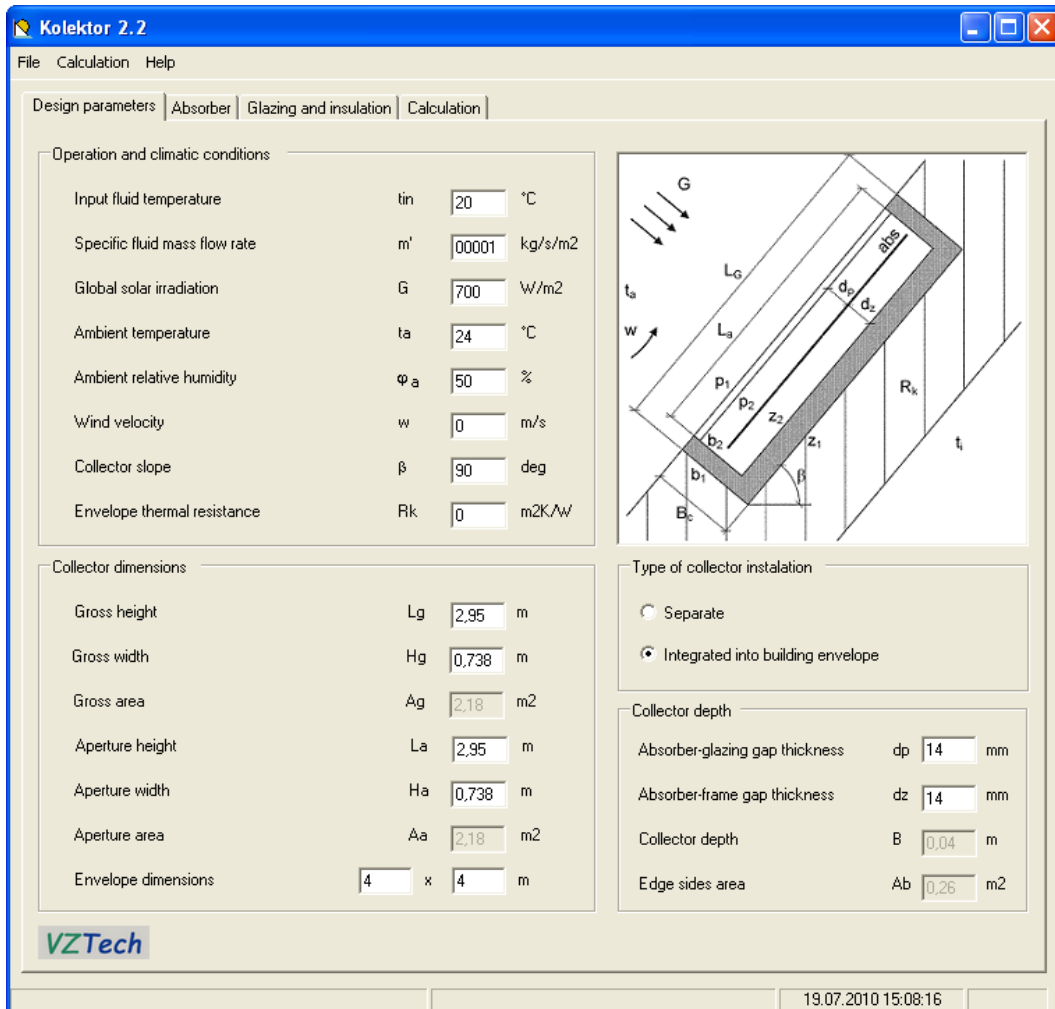


Abbildung A.4.: Eingabeparameter für Kollektor

**Kolektor 2.2**

File Calculation Help

Design parameters Absorber Glazing and insulation Calculation

Absorber parameters

Material: Copper Solar absorptance:  $\alpha_{abs}$  0,85

Thermal conductivity:  $\lambda_{abs}$  390 W/mK Front surface emissivity:  $\epsilon_{abs,p}$  0,1

Thickness:  $d_{abs}$  0,2 mm Back surface emissivity:  $\epsilon_{abs,z}$  0,5

Pipe register parameters

Length of riser pipes: L 2,95 m Collector mass flow rate:  $M'$  2,1771 kg/s

Number of riser pipes: ntp 5 pcs Pipe mass flow rate:  $M1'$  4,3542 kg/s

Distance between riser pipes (fin): W 147,6 mm

Pipe external diameter:  $D_e$  10 mm

Pipe internal diameter:  $D_i$  8 mm

Type of bond: Upper

Average bond width: a 3 mm

Average bond thickness: b 3 mm

Bond thermal conductivity:  $\lambda_{sp}$  300 W/mK

Bond thermal conductance:  $C_{sp}$  300 W/mK

Heat transfer fluid

Fluid type: Water

Mixing ratio: 0 % 100 %

Freezing temperature:  $t_f$  0 °C

VZTech

19.07.2010 15:08:16

Abbildung A.5.: Eingabeparameter für Absorber

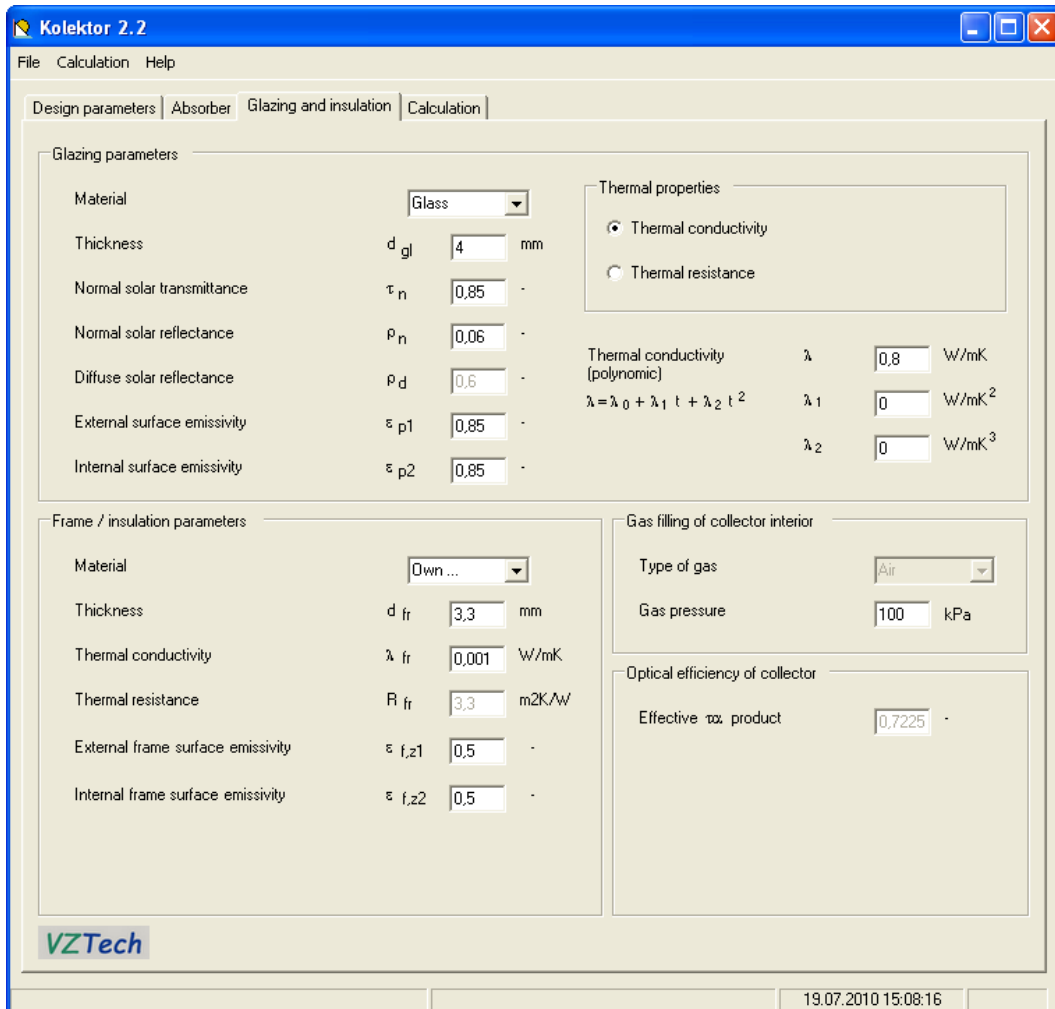


Abbildung A.6.: Glasparameter

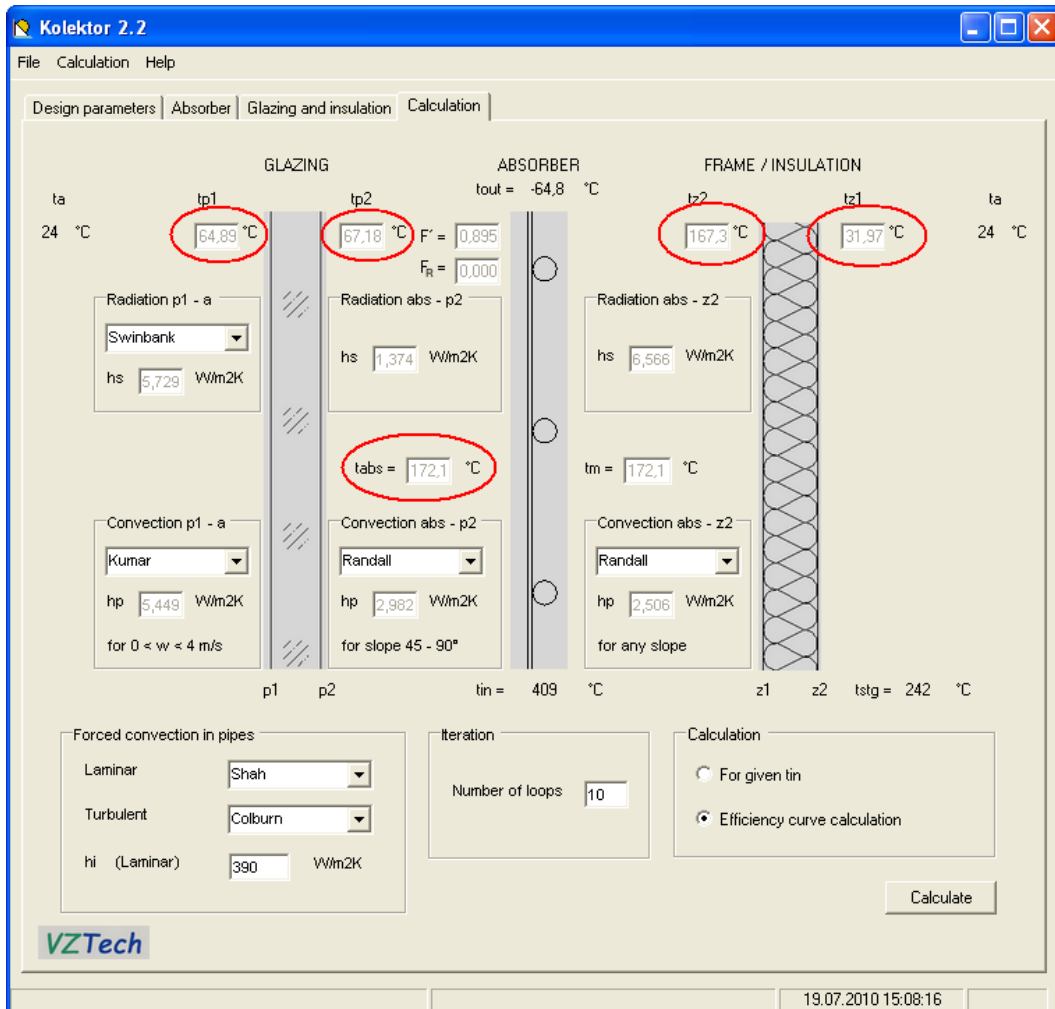


Abbildung A.7.: Glasparameter und Ergebnis

## Fassaden-Lüftungsgerät Typ Raumklimasystem FVM

### Technische Daten

Funktionen: Außen- Abluftbetrieb, Umluftbetrieb, Kühlen und Heizen, WFRG

#### Nur Umluftbetrieb

$n_A^1$ [-]	$n_S^2$ [-]	$V_A^3$ [m <sup>3</sup> /h]	$V_U^4$ [m <sup>3</sup> /h]	$L_{A18}$ [dB(A)]	$L_{wA}$ [dB(A)]	$Q_k \text{ Gerät}^5$ [W]	$Q_k \text{ Raum}^5$ [W]	$Q_h \text{ Gerät}^6$ [W]	$Q_h \text{ Raum}^6$ [W]	WRG-Zahl [-]	$P_{el}$ [W]
O	I	-	75	26	32	200	200	850	850	-	14
O	II	-	100	30	36	250	250	1100	1100	-	17

#### Nur Außenluftbetrieb

$n_A^1$ [-]	$n_S^2$ [-]	$V_A^3$ [m <sup>3</sup> /h]	$V_U^4$ [m <sup>3</sup> /h]	$L_{A18}$ [dB(A)]	$L_{wA}$ [dB(A)]	$Q_k \text{ Gerät}^5$ [W]	$Q_k \text{ Raum}^5$ [W]	$Q_h \text{ Gerät}^6$ [W]	$Q_h \text{ Raum}^6$ [W]	WRG-Zahl [-]	$P_{el}$ [W]
I	O	60	20	31	37	235	180	1355	1010	0,62	14
II	O	90	25	32	38	290	205	1670	1160	0,58	18
III	O	120	30	35	41	375	280	1940	1245	0,54	27

#### Außenluft- und Umluftbetrieb

$n_A^1$ [-]	$n_S^2$ [-]	$V_A^3$ [m <sup>3</sup> /h]	$V_U^4$ [m <sup>3</sup> /h]	$L_{A18}$ [dB(A)]	$L_{wA}$ [dB(A)]	$Q_k \text{ Gerät}^5$ [W]	$Q_k \text{ Raum}^5$ [W]	$Q_h \text{ Gerät}^6$ [W]	$Q_h \text{ Raum}^6$ [W]	WRG-Zahl [-]	$P_{el}$ [W]
I	I	60	80	32	38	330	275	1690	1345	0,62	23
I	II	60	100	34	40	350	295	1840	1500	0,62	23
II	I	90	90	33	39	370	290	1930	1415	0,58	27
II	II	90	105	35	41	400	320	2040	1530	0,58	28
III	I	120	110	35	41	430	335	2145	1450	0,54	37
III	II	120	130	37	43	465	370	2220	1525	0,54	37

$$w_{ok}/\Delta p_w \text{ [kg/h]/[kPa]} = 120/10$$

$$w_{oh}/\Delta p_w \text{ [kg/h]/[kPa]} = 100/3$$

Versorgungsspannung 230 V AC

Leistungsaufnahme ca. 100 VA

Gewicht: ca. 75 kg

Durch die Geräteverkleidung ist je nach Ausführung ein Leistungsverlust von z.B. 10% möglich

<sup>1</sup> Außenluftstufe

<sup>2</sup> Sekundärluftstufe

<sup>3</sup> Außenluftvolumenstrom

<sup>4</sup> Sekundärluftvolumenstrom durch Induktion + Sekundärvolumenstrom vom Umluftventilator (- 10%)

<sup>5</sup> Bei 17 °C Wasservorlauftemperatur; 32 °C Außenluftansaugtemperatur, nicht kondensierendem Betrieb und 26 °C Raumtemperatur; 27 °C Ablufttemperatur

<sup>6</sup> Bei 75 °C Wasservorlauftemperatur; -12 °C Außenluftansaugtemperatur und 22 °C Raumtemperatur (Ansaugtemperatur kann von mittlerer Raumtemperatur abweichen)

$n_A$  - Drehzahlstufe Außenluft

$n_S$  - Drehzahlstufe Umluftventilator

$V_A, V_S$  - Volumenstrom ( $\pm 10\%$ )

$L_{A18}$  - Schalldruckpegel im Fernfeld bei 18 m<sup>2</sup> Sabine Raumabsorption

$L_{wA}$  - Schalleistungspegel ( $\pm 3$  dB) (ohne Verkleidung und Luftdurchlässe)

$Q_k \text{ Gerät}$  - Gerätekühlleistung

$Q_h \text{ Gerät}$  - Geräteheizleistung

$w_{ok}$  - Nennwassermenge bei Kühlleistung\*

$w_{oh}$  - Nennwassermenge bei Heizleistung\*

$\Delta p_w$  - Wasserseitiger Druckverlust

$Q_k \text{ Raum}$  - Raumkühlleistung

$Q_h \text{ Raum}$  - Raumheizleistung

$P_{el}$  - Elektrische Leistungsaufnahme ( $\pm 20\%$ )

\* Korrektur bei anderen Wassermengen siehe Seite 8

Abbildung A.8.: Betriebszustände Fassadenlüftungsgerät