

Angelika Swatek, B.Sc.

Verwendung thermisch aktivierter Fußböden zur Gebäudekühlung in urbanen Wohnbauten

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Dipl.-Ing. Dr. techn. Richard Heimrath

Dipl.-Ing. Dr. techn. Thomas Mach

Beurteiler

Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. René Rieberer

Institut für Wärmetechnik

Graz, Dezember 2020

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

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. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

KURZFASSUNG

Titel: Verwendung thermisch aktivierter Fußböden zur Gebäudekühlung in urbanen Wohnbauten

Autor: Angelika Swatek

1. Stichwort: Fußbodenkühlung
2. Stichwort: Thermische Behaglichkeit
3. Stichwort: Kondensation

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Thematik der Kühlung über den Fußboden im Wohnbau. Die Gegebenheiten der Wohnnutzung sind im Vergleich zu einer gewerblichen Nutzung bzw. Büronutzung stark unterschiedlich, vor allem was die anfallenden Feuchtelasten durch Tätigkeiten des täglichen Lebens (z.B. Wäsche trocknen) betrifft. Auch ist die Thematik der thermischen Behaglichkeit vorrangiges Untersuchungsobjekt, wobei ein Vergleich diverser infrage kommender Normen vorgenommen wird und außerdem stellt sich die Frage, ob belastbare Aussagen in Bezug auf Auskondensation von Luftfeuchtigkeit mit den verwendeten Mitteln getroffen werden können.

Es wurde eine thermische Gebäudesimulation in TRNSYS (2017) erstellt und unter Verwendung verschiedener Modelle zur Berücksichtigung der Raumluftfeuchte ist eine Simulationsstudie durchgeführt worden.

Es ergibt sich, dass unter den gegebenen Umständen die notwendig abzuführende Wärmemenge jedenfalls erreicht wird um ein behagliches Raumklima zu erhalten. Eine belastbare Aussage in Bezug auf Kondensationsereignisse im Fußboden kann allerdings nicht verlässlich getroffen werden.

ABSTRACT

Title: Use of thermally activated floor for building cooling in urban residential buildings

Author: Angelika Swatek

1st keyword: floor cooling

2nd keyword: thermal comfort

3rd keyword: condensation

This thesis deals with the topic of floor cooling as an application in residential buildings. The conditions of residential use are very different compared to commercial or office use, especially with regard to the moisture loads caused by activities of daily life (e.g. hanging laundry out to dry). The topic of thermal comfort is also a primary object of investigation, whereby a comparison of various relevant standards is shown. Furthermore, the question arises whether reliable conclusions can be done with regard to condensation with the means used.

A thermal building simulation in TRNSYS (2017) has been set up and a simulation study has been carried out using different models for the consideration of room air humidity.

The results show that with the assumptions made, the necessary cooling to maintain a comfortable indoor climate can be achieved. However, a reliable statement regarding condensation events in the floor cannot be made with the methods used.

VORWORT

Die vorliegende Masterarbeit entstand im Zuge meines Masterstudiums Wirtschaftsingenieurwesen – Maschinenbau an der TU Graz am Institut für Wärmetechnik in der Zeit von Juni 2019 bis Dezember 2020. Die Arbeit wurde in enger Kooperation mit dem Projekt ECR Smart City 2020 durchgeführt. Mein Dank gilt dem Fördergeber für die Möglichkeit in diesem Rahmen meine Diplomarbeit erstellen zu können.

Ich möchte mich an dieser Stelle bei meinem Betreuer Richard Heimrath für die zahlreichen inhaltlichen Diskussionen bedanken, außerdem gilt mein Dank Thomas Mach und Andreas Heinz.

Auch gilt mein Dank meiner Mama, meinem verstorbenen Papa, meiner Schwester Eva und meinem Bruder Manuel, ohne deren Unterstützung dies alles nicht möglich gewesen wäre. Ich danke auch meinen Freunden für jegliche moralische Unterstützung und Aufheiterung und natürlich zu guter Letzt meinem Freund Christoph.

Danke.

Graz, 14.12.2020

Angelika Swatek

INHALTSVERZEICHNIS

<u>1</u>	<u>EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG</u>	<u>1</u>
1.1	Aktive Kühlung für ein Smartes Quartier	3
1.2	Simulationsstudie zur Tauglichkeitsevaluierung	4
<u>2</u>	<u>GRUNDLAGEN</u>	<u>7</u>
2.1	Behaglichkeit im Wohnbau	7
2.1.1	EN ISO 7730 (2006)	10
2.1.2	DIN EN 15251 (2007)	15
2.1.3	EN 16798-1 (2019)	17
2.1.4	Zusammenhang zwischen Raumlufttemperatur und Raumluftfeuchte	19
2.2	Flächenkühlung im Wohnbau	21
2.3	Verwendung von Parkettböden bei aktivierten Fußböden	24
2.4	Beschreibung des Mehrzonengebäudemodells in TRNSYS (2017)	26
2.4.1	Modellierung der Flächenkühlung in TRNSYS (2017)	32
2.4.2	Feuchtemodelle in TRNSYS (2017)	33
<u>3</u>	<u>SIMULATIONSTECHNISCHE MODELLIERUNG EINER FLÄCHENKÜHLUNG</u>	<u>38</u>
3.1	Verwendete Komponenten	38
3.2	Implementierung der Flächenkühlung in TRNSYS	40
3.3	Referenzwohnung in Smart City Mitte	42
3.3.1	Klima	43
3.3.2	Zonierung, Wandaufbau	44
3.3.3	Interne Wärme- und Feuchtelasten	47
3.3.4	Werte zur Berechnung des PMV-, PPD-Index	50
3.3.5	Lüftung, Infiltration, Verschattung	50
3.4	Koeffizientenberechnung für das detaillierte Feuchtemodell	50

4	<u>ANALYSE DER SIMULATIONSERGEBNISSE</u>	53
4.1	Simulationsvarianten	53
4.2	Grundlegende Ergebnisse der durchgeführten Simulationsstudie	54
4.3	Detaillierte Ergebnisse am Beispiel einer ausgewählten Variante	59
4.3.1	Szenario E-B-8-18	60
	a) Kenngrößen Fußbodenkühlung	60
	b) Ergebnisse der Behaglichkeitsauswertung	63
4.4	Ausgewählte Vergleiche	67
4.4.1	Auswirkung der Vorlauftemperatur	68
4.4.2	Auswirkung der Feuchtelasten	69
4.4.3	Auswirkung des detaillierten Feuchtemodells	70
5	<u>MESSKONZEPT ZUR SIMULATIONSVALIDIERUNG</u>	71
5.1	Simulationsrelevante Messdaten	71
6	<u>SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK</u>	75
	<u>LITERATURVERZEICHNIS</u>	1
	<u>ANHANG</u>	4
A1.	Auswertung Variante B-S-3-kK	4
A2.	Auswertung Variante B-S-3-18	7
A3.	Auswertung Variante B-S-8-18	11
A4.	Auswertung Variante B-B-3-18	14
A5.	Auswertung Variante B-B-8-18	17
A6.	Auswertung Variante E-B-3-18	20
A7.	Auswertung Variante E-B-8-14	23
A8.	Auswertung Variante E-B-8-opt	26

1 EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG

Wie bei Nichtwohngebäuden zu beobachten ist, wird das Einhalten bestimmter Raumtemperaturgrenzen in den Innenräumen vor allem im Sommer bzw. aufgrund klimatischer Veränderungen zu einer zunehmenden Herausforderung. Dem Wunsch nach Kühlung wird auch im Wohnbau mehr und mehr nachgegangen, einerseits durch Nachrüsten diverser Kühlsysteme (meist Split-Kühlaggregate) bei Bestandsbauten, andererseits durch Implementieren eines solchen bei Neubauten. Grund dafür sind steigende Temperaturen in den Sommermonaten, wobei die in diesen Zeiten stattfindende Klimaerwärmung vor allem im urbanen Raum deutlich spürbar ist. Besonders in den Stadtkernen stellen sich von Ende Mai bis Anfang September immer höhere Temperaturen ein, da ein Großteil der Flächen bebaut bzw. betoniert ist, welche sich untertags stark aufheizen und die gespeicherte Wärme in den Nachtstunden wieder abgeben. Die Bewohner werden dadurch vor eine große Herausforderung gestellt, welche vor allem bei älteren oder chronisch kranken Menschen mit einem gesundheitlichen Risiko einhergeht. Es ist außerdem bekannt, dass auch die Schlafqualität bei hohen nächtlichen Temperaturen abnimmt, wobei ein Anstieg von sogenannten Tropennächten (minimale Tagestemperatur $\geq 20\text{ °C}$) in den letzten Jahren erfolgt ist. Das Vorkommen von Tropennächten geschieht im Vergleich zu Freiflächen im urbanen Raum nach Fenner et al. (2015) dreimal häufiger. Durch die häufiger vorkommende Hitze in den Städten kommt es auch zu einem signifikanten Anstieg der Mortalität (ebenfalls Fenner et al. (2015)).

Im Hitzeschutzplan Steiermark von Pollhammer (2016) wird ebenfalls von einer Zunahme der Tropennächte und der Anzahl der Kühlgradtage (KGT) berichtet. Darunter ist die Summe der Differenz zwischen Außenlufttemperaturmittel und Raumtemperatur über ein Jahr zu verstehen, wobei das Tagesmittel der Außenlufttemperatur einen Grenzwert von $18,3\text{ °C}$ überschreiten muss (vgl. Schlaisich (2013)).

Auch Gobiert et al. (2012) haben unter Berücksichtigung von 24 regionalen Klimasimulationen Berechnungen für jeden steirischen Bezirk durchgeführt und sind für Graz zum Schluss gekommen, dass bis 2050 das Jahresmittel der Außenlufttemperatur um $1,3\text{ K}$ ansteigen wird, wobei die Ergebnisse eine Bandbreite der Temperaturzunahme von $0,6\text{ K}$ bis $2,1\text{ K}$ aufweisen. Außerdem ist mit einer Zunahme von Kühlgradtagen um $98,4\text{ KGT}$ pro Jahr zu rechnen, was in Abbildung 1-1 grafisch dargestellt ist.

1 Einleitung und Aufgabenstellung

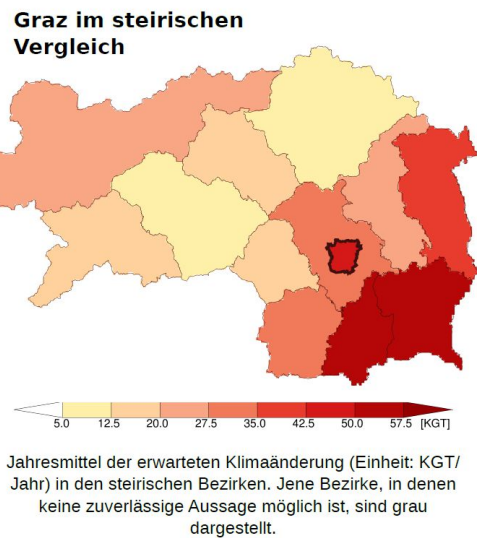


Abbildung 1-1: Änderung der KGT in der Steiermark (Gobiet et al., 2012)

Wenn man sich nun Graz in Form aufgeteilt in sogenannte Klimatope ansieht, ergibt sich das in Abbildung 1-2 gezeigte Bild. Der Stadtkern in Bildmitte ist rot eingefärbt, was bedeutet, dass dieser als städtische Wärmezone angesehen wird.

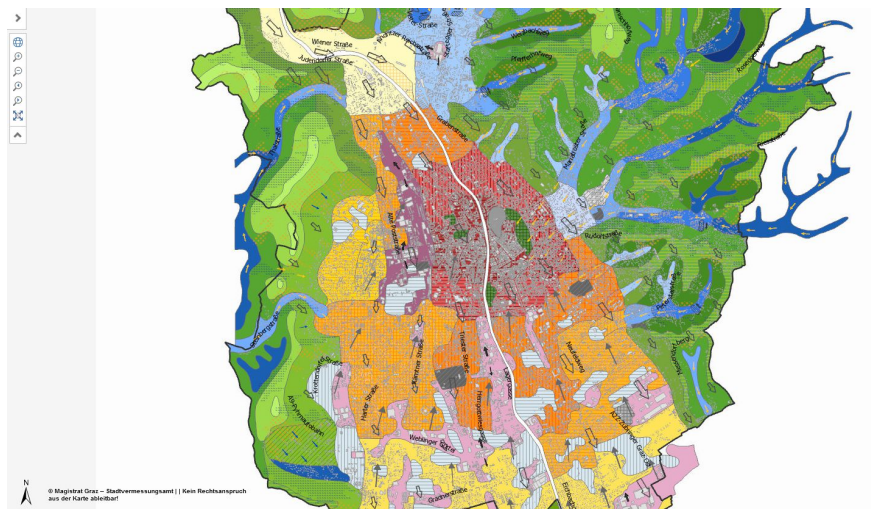


Abbildung 1-2: Klimatope in Graz (Stadtvermessungsamt, 2020)

Nördlich, südlich und westlich dieses Stadtkerns erstrecken sich in orange dargestellte Blockbebauungszonen, denen eine mäßige Überwärmung zugeschrieben wird.

Diese Kenntnisse bzgl. steigender Erwärmung bei der Entwicklung neuer urbaner Wohnbauten zu berücksichtigen sollte nicht mehr nur ein Schlagwort darstellen. Eine der größten Herausforderungen in Bezug auf die Stadtentwicklung ist die Gestaltung und Planung von lebenswertem aber auch zukunftstauglichem Wohnraum. Die Landeshauptstadt der Steiermark ist eine der am stärksten wachsenden Städte des Landes. Statistische Erhebungen

1 Einleitung und Aufgabenstellung

deuten darauf hin, dass die Einwohnerzahl von Graz bis zum Jahr 2034 um 59.000 Personen (+22 %) zunehmen soll (Präsidialabteilung Magistrat Graz, 2015).

Um neuen Wohnraum zu erschließen und zu schaffen, liegt das Augenmerk jetzt vor allem auf dem Stadtentwicklungsgebiet Graz West, welchem ein großes Entwicklungspotential zugeschrieben wird.

1.1 Aktive Kühlung für ein Smartes Quartier

Westlich des Grazer Hauptbahnhofs befindet sich ein solches Gebiet, in dem eine „Smart City“ am entstehen ist. Der Begriff Smart City ist noch relativ neu und wird von der Stadt Graz wie folgt interpretiert:

„Mit dem Begriff „Smart City“ wird eine energieeffiziente, ressourcenschonende und emissionsarme Stadt höchster Lebensqualität bezeichnet, wo neueste Energietechnologien zur Anwendung kommen. ... Das erste Smart City Quartier entsteht im Umfeld der Helmut List Halle und nennt sich „My Smart City Graz“.“

(Stadtbaudirektion Graz, 2020)

Das Institut für Wärmetechnik ist im Rahmen des Forschungsprojektes „ECR-Smart City 2020“ an diesen Entwicklungen beteiligt, wobei u.a. die Grundlage für die Umsetzung eines durchgängigen und konsistenten Planungsprozesses entwickelt und prototypisch erprobt wird. Zu diesem Zweck werden numerische Energiesystemmodelle entwickelt, die u.a. das energietechnische Verhalten des Stadtteils „Smart City Mitte“ abbilden sollen.

Die Unterstützung der Bauträger bei auftretenden energierelevanten Fragestellungen ist dabei ebenso Bestandteil der vom Institut für Wärmetechnik durchgeführten Forschungstätigkeit. Der Bauabschnitt Baufeld Mitte (vgl. Abbildung 1-3) ist Teil des Smart City Gebiets Graz, in dem neben ausreichenden Freiflächen eine Mischung aus Wohn- und Büronutzung ausgeführt werden soll, wobei es sich um den umfangreichsten Wohnbau (ca. 230 Wohneinheiten) der Smart City Mitte handelt.

1 Einleitung und Aufgabenstellung



Abbildung 1-3: Rendering des Untersuchungsgebiets Smart City Mitte (Verein Smart City Graz Service und Marketing, 2018)

Wie dem Energiekonzept der Smart City Mitte von Vallant (2020) entnommen werden kann, befindet sich im Untergrund des Baufeldes in 32-42 m Tiefe eine Wasserführungsschicht, die ein großes Potential zur energetischen Nutzung (u.a. Heizen und Kühlen) darstellt. Im Wohnbereich sind zur winterlichen Konditionierung Flächenheizungen im Boden (mit Wasser durchflossen) vorgesehen. Da bekannt ist, dass mit demselben System auch eine Kühlung möglich ist und dadurch nur geringfügig höhere Kosten entstehen, ergab sich die Frage der Durchführbarkeit unter den hier gegebenen Randbedingungen. Das im Stadtentwicklungsgebiet Graz West zur Verfügung stehende Grundwasser weist eine Temperatur von 12 °C ¹ auf, was zur Verwendung zum Kühlen über den Fußboden aufgrund einer sehr wahrscheinlichen Taupunktsunterschreitung nicht geeignet ist. Ein leichtes Erwärmen bzw. Hochmischen über den Rücklauf auf etwa 16 bis 18 °C ist zu empfehlen.

1.2 Simulationsstudie zur Tauglichkeitsevaluierung

Bei der Erstellung der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationsstudie werden vor allem die von Bauträger und Planer vorgegebenen Randbedingungen berücksichtigt, aber auch leichte Modifikationen sind vorgesehen, um ein etwaiges Optimierungspotential aufzuzeigen. Lengsfeld et al. (2006) vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik messen einem ausgeglichenen Wärme-, Feuchte- und Lufthaushalt sehr große Bedeutung zu, denn ein

¹ vgl. <https://ehyd.gv.at>, HZBNR 325639, Graz 14, BI 3416, Grundwassertemperatur - Monatsmittel

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Ungleichgewicht hat Auswirkungen auf Bausubstanz, Bewohner, Behaglichkeit und kann zu einem erhöhten Energieaufwand führen. Um diese negativen Konsequenzen für die Smart City Graz Mitte zumindest simulationstechnisch ausschließen zu können, wird diese Simulationsstudie durchgeführt, in der vor allem Worst Case Szenarios mit sehr geringem Luftwechsel berechnet und mit deren Ergebnissen folgende Fragen beantwortet werden sollen:

1. Mit welcher Kühllast ist in dem Gebäude zu rechnen (ideal ermittelt²) und kann diese mit dem eingebauten Fußboden-Kühlsystem überhaupt abgedeckt werden?

Es wird eine hinsichtlich der Kühlung kritische Wohnung simulationstechnisch modelliert, bei der mit einem hohen Kühlbedarf zu rechnen ist (Dachgeschoß, große Fensterflächen). Zuerst wird der Kühlbedarf ohne eine technische Anlage zu berücksichtigen ideal ermittelt. In weiterer Folge wird unter Verwendung einer mit kaltem Wasser durchflossenen Fußbodenaktivierung nachgeprüft, inwieweit diese abgedeckt werden kann.

Die Auswertung beinhaltet neben den wichtigsten Kennwerten (abgeführte Wärmemenge absolut [kWh/a] und spezifisch [kWh/(m²a)]), detaillierte Verläufe die das System der Fußbodenkühlung darstellen, also sich einstellende Temperaturen des Raumes und der Fußbodenoberfläche, Auftreten von Kondensation und der sich ergebende PPD-Index (vgl. Gl.2-1).

2. Welche Temperaturabsenkungen (im Mittel bzw. maximal) stellen sich im Raum durch eine Fußbodenkühlung ein?
3. Kommt es unter den simulierten Randbedingungen zu Kondensation an der Fußbodenoberfläche bzw. im Fußboden und wenn ja, für wie viele Stunden im Jahr?
4. Welche Aussagen können mit der gewählten Methodik hinsichtlich der Behaglichkeit im Raum getroffen werden, die sowohl die im Raum auftretenden Temperaturen als auch die Feuchte berücksichtigen?

Bei der Beurteilung der Behaglichkeit gilt es vor allem auch die sich einstellende relative Luftfeuchte im Raum in die Auswertungen miteinzubeziehen, wobei alles im Zusammenhang mit dieser Thematik Relevante in Abschnitt 2.1 zusammengefasst ist. Es wird außerdem in den darauf folgenden Kapiteln ein kurzer Überblick über Flächenkühlung im Allgemeinen gegeben bzw. sind in Kapitel 2.3 ein paar wichtige Punkte hinsichtlich der Verwendung von Parkettböden im Zusammenhang mit einer aktiven Kühlung über den Fußboden angeführt.

² Kühllleistung zur Einhaltung von 26 °C Raumlufttemperatur wird ermittelt

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Der Vollständigkeit halber wird in Kapitel 2.4 das in der Simulationsumgebung TRNSYS (2017) implementierte Modell zur Simulation von Gebäuden bzw. Wohnungen erläutert, wobei hier auch darauf eingegangen wird, wie man eine Fußbodenkühlung in TRNSYS (2017) abbilden kann und welche Modelle zur Berechnung und Berücksichtigung der Raumlufffeuchte zur Verfügung stehen.

In Kapitel 3 werden im Wesentlichen alle für die Gebäudesimulation relevanten Eingabewerte angeführt, bevor es in Kapitel 4 zu einer Beschreibung der Ergebnisse unter Berücksichtigung der oben postulierten Fragen kommt.

Nach Fertigstellung des Bauvorhabens (voraussichtlich 2021) sollen auf Wunsch des Bauträgers mehrere Demonstrationswohnungen mit einer umfassenden Messtechnik ausgestattet werden. Dadurch wird ein Vergleich zwischen idealisierter Simulationsstudie und realen Bedingungen möglich, wodurch die gewonnenen Erkenntnisse aus der Berechnung überprüft und die Simulation nach Bedarf nachgebessert werden kann, um in Zukunft ähnliche Fragestellungen mit noch höherer Qualität beantworten zu können. Das zu diesem Zweck erstellte Messkonzept ist Kapitel 5 zu entnehmen.

2 GRUNDLAGEN

Die folgenden Seiten sollen einen Überblick über die relevanten Grundlagen vermitteln, wobei einige generelle Aspekte der thermischen Behaglichkeit erläutert werden, bevor auf die relevanten Normen im Detail eingegangen und auch der Einflussfaktor Raumluftfeuchte in Bezug auf die Behaglichkeit genauer beleuchtet wird. Darauf folgend soll ein Einblick in die Thematik der Fußbodenkühlung gegeben werden und worauf bei der Verwendung von Holzparkettböden zu achten ist. Abschließend werden Details der Simulationsumgebung TRNSYS (2017) erläutert, wozu das Gebäudemodell (Type 56), die Modellierung einer Bauteilaktivierung und die implementierten Feuchtemodelle zählen.

2.1 Behaglichkeit im Wohnbau

Die Aspekte thermischer Behaglichkeit dürfen an dieser Stelle keinesfalls außer Acht gelassen werden, denn schließlich soll den Bewohnern der Smart City Graz Mitte durch den Benefit der Raumtemperierung in den Sommermonaten hinsichtlich der Wohnqualität kein ungewollter Nachteil entstehen. Es gibt grundsätzlich mehrere Kriterien die Raumluft betreffend, die einzuhalten sind, um von der Mehrzahl der Menschen als behagliches Wohnklima (vgl. Abbildung 2-1, grüner Bereich) wahrgenommen zu werden.

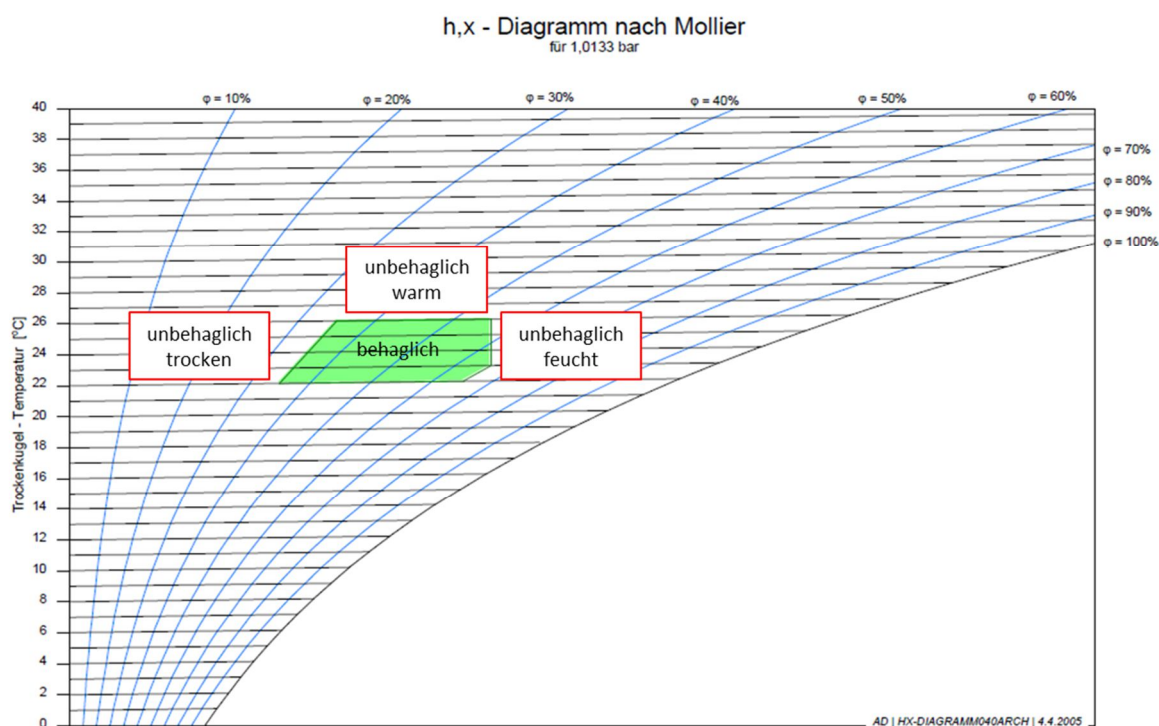


Abbildung 2-1: Bereiche thermischer Behaglichkeit im h,x-Diagramm (Dentel und Dietrich, 2006)

Ein Überschreiten dieses Bereichs führt zu einem unbehaglichen Gefühl und ist, wie Dentel und Dietrich (2006) anführen, auf das Nichteinhalten folgender Grenzen zurückzuführen:

2 Grundlagen

- Raumlufttemperatur zwischen 22 °C und 26 °C
- Relative Raumluftfeuchte zwischen 35 % (darunter Austrocknen der Schleimhäute) und 65 % (darüber steigt die Neigung der Schimmelpilzbildung)
- Absoluter Feuchtegehalt von 11 g Wasserdampf je 1 kg trockener Luft (darüber können Schwitzvorgänge nicht wie gewohnt ablaufen; Schwülegrenze)

Diese These wird durch Seidel et al. (2013) untermauert indem sie die thermische Behaglichkeit als einen Zustand definieren „bei dem der menschliche Körper die geringsten thermoregulatorischen Aufwendungen vornehmen muss, um eine konstante Körperkerntemperatur aufrecht zu erhalten“. Der Bundesverband für Flächenheizung und -kühlung e.V. (2015), in Folge kurz BVF, erwähnt außerdem, dass der Mensch seine 37 °C Körpertemperatur bei höheren Raumtemperaturen durch Strahlungsaustausch mit kühleren Flächen leichter halten kann. Die EN ISO 7730 (2006) legt folgende Parameter für ein positives Raumempfinden fest:

- Raumluft- und Strahlungstemperatur
- Geschwindigkeit der bewegten Raumluft
- Raumluftfeuchte
- Bekleidung und Aktivitätsgrad der Bewohner

Auch wird in Abbildung 2-2 gezeigt, wie die Anzahl der Unzufriedenen (PD) mit der Oberflächentemperatur des Fußbodens zusammenhängt. Nur 6 % Unzufriedene sind bei einer Bodentemperatur von ca. 24-25 °C zu erwarten, bei üblichen Oberflächentemperaturen durch Fußbodenkühlung (in etwa 20 °C) steigt der Anteil der Unzufriedenen auf etwa 10% an. Für die genaue Berechnung dieser Werte wird auf Kapitel 2.1.1 verwiesen.

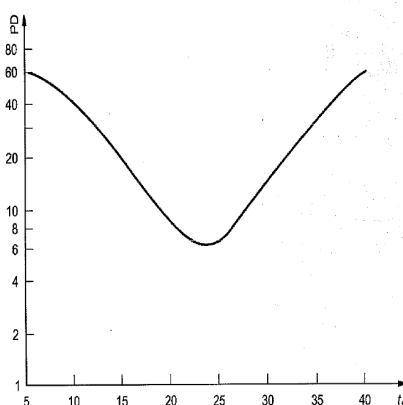


Abbildung 2-2: Prozentsatz an Unzufriedenen PD als Funktion der Fußbodentemperatur t_f (EN ISO 7730, 2006)

Aber auch die anderen Umschließungsflächen haben Einfluss auf die thermische Behaglichkeit, denn ein ausgewogener Strahlungsaustausch wird positiv wahrgenommen. Der

2 Grundlagen

BVF (2015) erwähnt, dass das von Flächenheizungen und -kühlungen erzeugte Wohnklima den physiologischen Bedürfnissen des Menschen besonders entgegenkommt, da es sich auch positiv auf das vegetative Nervensystem auswirkt, durch das die autonomen Körperfunktionen (Pulsrate, Blutdruck, Atmung, etc.) gesteuert werden. Es hat sich gezeigt, dass bei einer Flächenkühlung die Raumlufttemperatur im Vergleich zu anderen Klimatisierungskonzepten nicht so weit gesenkt werden muss, damit sich bei den Bewohnern ein behagliches Gefühl einstellt, da der Strahlungsaustausch besser gelingt. In Abbildung 2-3 zeigt sich wiederum, dass bei einer mittleren Raumlufttemperatur von 25 °C (Kühlphase Sommer) die mittlere Oberflächentemperatur zwischen 13 und ca. 20 °C liegen soll um als angenehm empfunden zu werden.

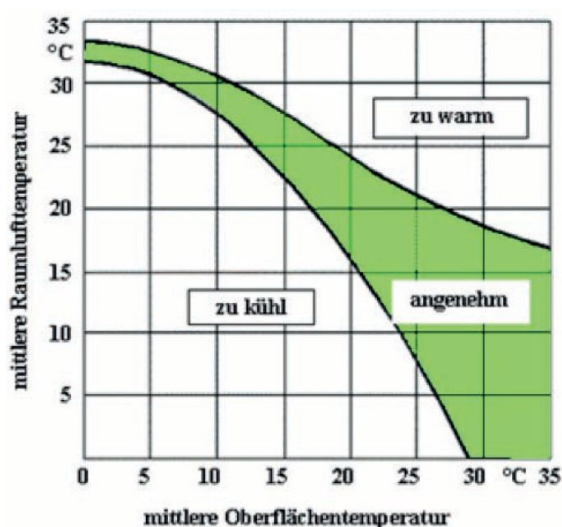


Abbildung 2-3: Behaglichkeitsbereiche in Abhängigkeit von mittlerer Raumlufttemperatur über mittlerer Oberflächentemperatur (BVF, 2015)

Mit getauschten Achsen wird derselbe Zusammenhang in Abbildung 2-4 gezeigt, wo auch hier wieder die Felder der als behaglich empfundenen Temperaturbereiche nach verschiedenen Literaturquellen farblich markiert sind. Deutlich erkennbar ist die obere Grenze der Raumlufttemperatur bei 25 °C, wobei i.d.R. 26 °C als Grenztemperatur angesetzt wird, ab welcher der Raum gekühlt werden muss.

Ein weiterer vom BVF (2019) erwähnter Vorteil der Flächenkühlung im Vergleich zu konvektiven Systemen ist der, dass Zugerscheinungen praktisch nicht vorkommen, da keine hohen Luftgeschwindigkeiten im Raum anfallen. Es wird aber auch erwähnt, dass man auf die Luftqualität und die Raumluftfeuchte achten muss und es wird ebenfalls zu einem Lüftungssystem geraten, das die Frischluftversorgung sicherstellt und außerdem die anfallenden Feuchtelasten zuverlässig abführen kann.

2 Grundlagen

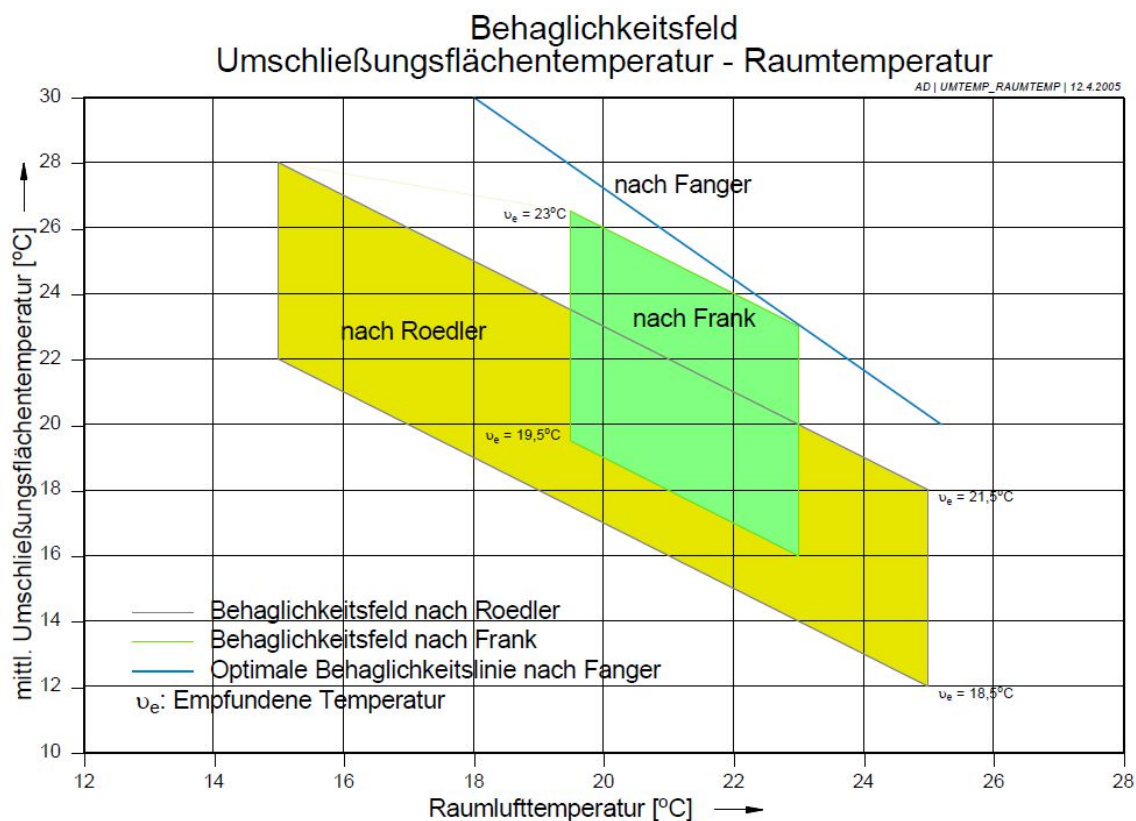


Abbildung 2-4: Behaglichkeitsbereiche in Abhängigkeit von mittlerer Oberflächentemperatur über mittlerer Raumlufttemperatur (Franz, 1975)

Hinsichtlich der Behaglichkeit können bzgl. der Temperatur mehrere Normen verwendet werden, da das Untersuchungsfeld Wohnbau entweder explizit angeführt oder von der Verwendung zumindest nicht ausgeschlossen wird. Im Folgenden wird speziell auf die EN ISO 7730 (2006), die mittlerweile zurückgezogene DIN 15251 (2007) und deren Ersatz der EN 16798-1 (2019) eingegangen. Es gilt herauszufinden, welche Grenztemperaturen aus diesen Normen für die Kategorie Wohnbau abgeleitet werden können und in welcher Form man Aussagen darüber quantifizieren kann. Es wird auch gezeigt, in welchen Bereichen sich Unterschiede ergeben bzw. ob grundsätzlich unterschiedliche Ansätze gewählt wurden.

2.1.1 EN ISO 7730 (2006)

Das Hauptaugenmerk dieser Norm liegt in der Ergonomie der thermischen Umgebung und gibt Aufschluss über die Ermittlungsmethoden der Größen PMV- und PPD-Index.

Die Anwendbarkeit dieser Norm in Bezug auf das vorliegende Projekt ist gegeben, da unter dem Punkt „Anwendungsbereich“ folgendes zu lesen ist:

„Obwohl diese Norm für die Arbeitsumgebung erstellt wurde, kann sie aber auch für jede andere Art der Umgebung angewendet werden“.

2 Grundlagen

Der oben bereits erwähnte PMV-Index oder auf Englisch „Predicted Mean Vote“ beschreibt die zu erwartende Klimabeurteilung einer Personengruppe anhand einer 7-stufigen Skala (vgl. Tabelle 2-1, 1. Zeile), wobei dem Zustand der thermischen Behaglichkeit der Wert „0“ zugewiesen wird.

Tabelle 2-1: Zuordnung der Zahlenwerte des PMV-Index zur Beurteilungsskala (Willems et al., 2006)

Bewertung des Raumklimas als						
zu warm	warm	etwas warm	neutral	etwas kühl	kühl	kalt
+ 3	+ 2	+ 1	0	- 1	- 2	- 3

Die Berechnung des PMV-Index erfolgt mit folgender Formel.

$$PMV = (0,303e^{-0,036M} + 0,028)(M - W - q_{ges}) \quad \text{Gl. 2-1}$$

Die darin enthaltenen Formelzeichen stehen für folgende Größen:

M Energieumsatz einer Person [W/m²]

q_{ges} von der Körperoberfläche abfließender Wärmestrom [W/m²]

W abgegebene, wirksame, mechanische Leistung [W/m²]

Es ist zu beachten, dass im Wärmestrom über die Körperoberfläche Verluste durch Wärmestrahlung, Konvektion an der Kleidungsoberfläche, die Wärme der ausgeatmeten Luft, der Dampfdiffusion über die Haut und dem Verdunsten von Schweiß auf der Haut berücksichtigt werden. Das Tragen unterschiedlicher Kleidung und die damit einhergehende Beeinflussung der Wärmeabgabe wird mit dem sogenannten clothing factor beschrieben. Dieser ist ein Maß für den Widerstand, der der Wärmeabgabe entgegengesetzt wird, wobei 1 clo einem Widerstand von 0,155 m²K/W entspricht. Typische Werte sind u.a. in Schild et al. (2011) angegeben und können auszugsweise Tabelle 2-2 entnommen werden.

2 Grundlagen

Tabelle 2-2: Wärmedurchlasswiderstand für unterschiedliche Bekleidungen (vgl. Schild et al., 2011)

Bekleidung	Wärmedurchlasswiderstand in clo
ohne	0
leicht (z.B. leichte Sommerbekleidung)	0,5
mittel (z.B. leichte Bürokleidung)	1,0
warm (z.B. Winterbekleidung im gemäßigten Klima)	2,0
sehr Warm (z.B. Polarbekleidung)	> 3,0

Tabelle 2-3: Wärmeabgabe von Personen bei verschiedenen Tätigkeiten (Hörner und Casties, 2016)

Aktivität	Gesamtwärmeabgabe		Sensible Wärmeabgabe
	met	W/Person *	W/Person
Angelehnt	0,8	80	55
Sitzend, entspannt	1,0	100	70
Sitzende Tätigkeit (Büro, Wohnung, Schule, Labor)	1,2	125	75
Stehende, leichte Tätigkeit (Einkaufen, Labor, leichte Industriearbeit)	1,6	170	85
Stehende, mittelschwere Tätigkeit (Verkauf, Hausarbeit, Maschinenbedienung)	2,0	210	105
Gehen auf einer Ebene mit 5 km/h	3,4	360	120

* gerundete Werte bei durchschnittlicher Körperoberfläche von $1,8\text{ m}^2$

Beim Energieumsatz bzw. der Wärmeproduktion einer Person kommt es darauf an, welche Tätigkeit diese gerade ausführt. Hörner und Casties (2016) führen an, dass darüber hinaus auch Alter, Geschlecht und die Umgebungstemperatur eine Rolle spielen. Im Durchschnitt beträgt die Mindestwärmeleistung die notwendig ist um die Körpertemperatur konstant zu halten, bei völliger Ruhe und 20 °C Raumtemperatur, rund 80 Watt. Der Ruheenergieumsatz im Sitzen beträgt wiederum 1 met, wobei dies einer spezifischen Wärmeabgabe von 58 W/m^2 entspricht, wodurch sich bei einer mittleren Körperoberfläche von $1,8\text{ m}^2$ etwa 100 W Gesamtwärmeabgabe ergeben. Diese Wärmeabgabe kann in einen sensiblen (trockenen) Anteil und einen latenten (feuchten) aufgeteilt werden, eine gute Übersicht darüber gibt Abbildung 2-5. Im linken Bild ist zu sehen, dass mit steigender Wärmeabgabe der Anteil der Wärme durch Verdunstung stärker zunimmt, wobei dieser bei einer Wärmeproduktion von 100-200 Watt (vgl. Mindestwärmeleistung Mensch) eine untergeordnete Rolle spielt. Auf der rechten Seite sieht man, dass die Anteile von Konvektion, Strahlung und Verdunstung sehr stark von der vorherrschenden Raumlufttemperatur abhängig sind.

2 Grundlagen

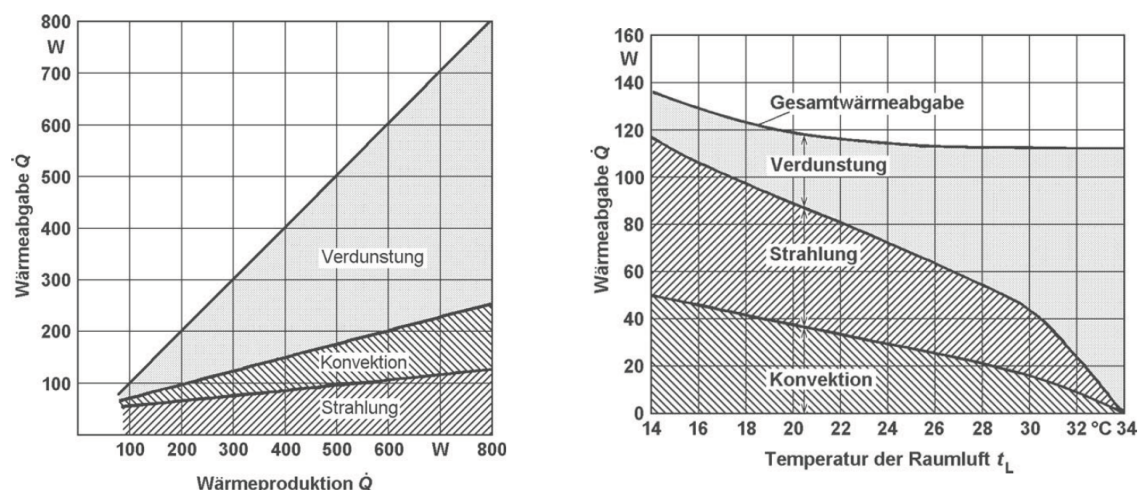


Abbildung 2-5: Wärmeabgabemechanismen des Menschen (Hörner und Casties, 2016)

Der PMV-Index wird üblicherweise EDV-gestützt ermittelt, da eine Reihe empirischer Gleichungen dafür zu lösen sind, welche u.a. bei Hörner und Casties (2016) angeführt sind.

Mit Kenntnis des PMV-Index kann auch der PPD-Index nach der untenstehenden empirischen Formel berechnet werden. Dieser beschreibt den Anteil an Unzufriedenen, obwohl die Personen demselben Umgebungsklima ausgesetzt sind (= Predicted Percentage of Dissatisfied)

$$\text{PPD} = 100 - 95 e^{-0,03353 \text{ PMV}^4 - 0,2179 \text{ PMV}^2} \quad \text{Gl. 2-2}$$

Der PPD-Index stellt, wie Dentel und Dietrich (2006) zeigen, eine quantitative Vorhersage der Anzahl der mit einem bestimmten Umgebungsklima unzufriedenen Personen dar. Er drückt den Prozentsatz einer großen Personengruppe aus, die ein Raumklima als heiß (+3), warm (+2), kühl (-2) oder kalt (-3) wahrnehmen. Man nehme an, dass, wie in Abbildung 2-6, der PMV-Index einen Wert knapp über 1 annimmt, so ergibt sich daraus, dass 40% der anwesenden Personen unzufrieden sind.

2 Grundlagen

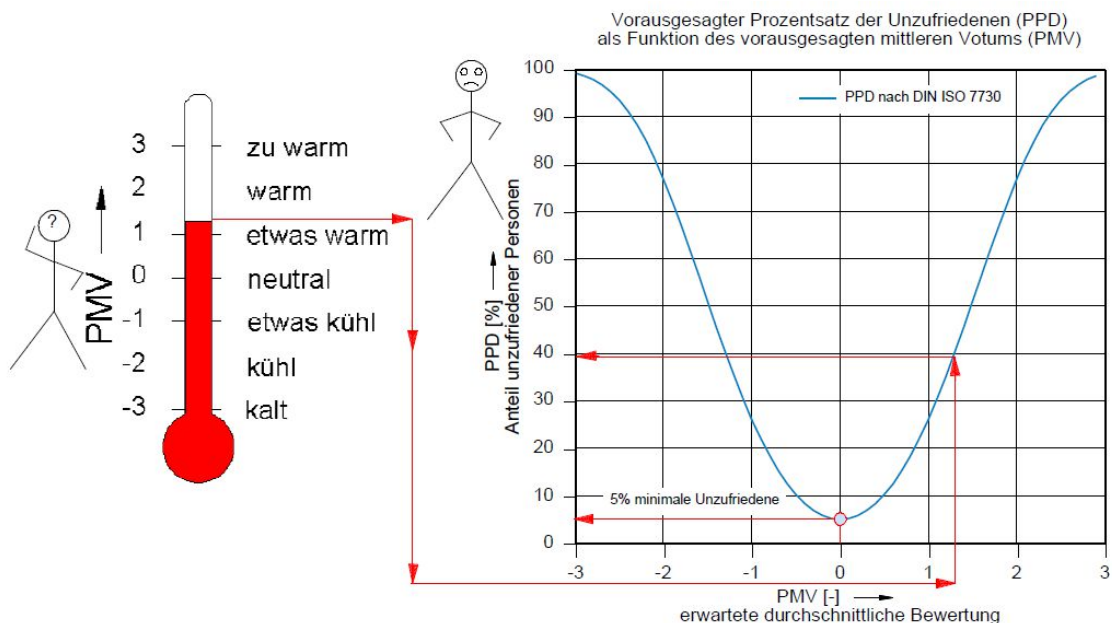


Abbildung 2-6: Zusammenhang zwischen PMV- und PPD-Index (Dentel und Dietrich, 2016)

Auch gibt die EN ISO 7730, die einzuhaltenden Temperaturen betreffend, Gestaltungskriterien für unterschiedliche Raumarten an, welche in Tabelle 2-4 zu finden sind. Den einzelnen Gebäude- bzw. Raumtypen werden typische spezifische Wärmeabgaben zugeordnet. Die einzuhaltenden operativen Raumtemperaturen³ sind in drei Kategorien eingeteilt, wobei jeder dieser Kategorien eine mittlere Temperatur zugewiesen ist, die nach oben und unten im Rahmen eines bestimmten Temperaturbands streuen kann. Diese Kategorisierung geschieht sowohl für die Heiz- als auch für die Kühlperiode.

Tabelle 2-4: Gestaltungskriterien für unterschiedliche Raumarten

Gebäude-/Raumtyp	Aktivität Wm ²	Kategorie	Operative Temperatur °C		Maximale mittlere Luftgeschwindigkeit ^a m/s	
			Sommer (Kühlungs- periode)	Winter (Heizperiode)	Sommer (Kühlungs- periode)	Winter (Heizperiode)
Einzelbüro Bürolandschaft Konferenzraum Auditorium Cafeteria/ Restaurant Klassenraum	70	A	24,5 ± 1,0	22,0 ± 1,0	0,12	0,10
		B	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0	0,19	0,16
		C	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0	0,24	0,21 ^b
Kindergarten	81	A	23,5 ± 1,0	20,0 ± 1,0	0,11	0,10 ^b
		B	23,5 ± 2,0	20,0 ± 2,5	0,18	0,15 ^b
		C	23,5 ± 2,5	22,0 ± 3,5	0,23	0,19 ^b
Kaufhaus	93	A	23,0 ± 1,0	19,0 ± 1,5	0,16	0,13 ^b
		B	23,0 ± 2,0	19,0 ± 3,0	0,20	0,15 ^b
		C	23,0 ± 3,0	19,0 ± 4,0	0,23	0,18 ^b

Wenn man diese Kategorien für die operative Raumtemperatur nun in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur darstellt, ergibt sich eine Darstellung wie in Abbildung 2-7. Die Werte

³ entspricht in etwa dem arithmetischen Mittel aus Raumlufttemperatur und mittlerer Oberflächentemperatur

2 Grundlagen

der x-Achse entsprechen dem Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur $\Theta_{e, \text{Tag}}$. Der Winterfall wird repräsentiert durch den linken Block ($\Theta_{e, \text{Tag}} \leq 17 \text{ °C}$), der Sommerfall durch den rechten ($\Theta_{e, \text{Tag}} \geq 20 \text{ °C}$).

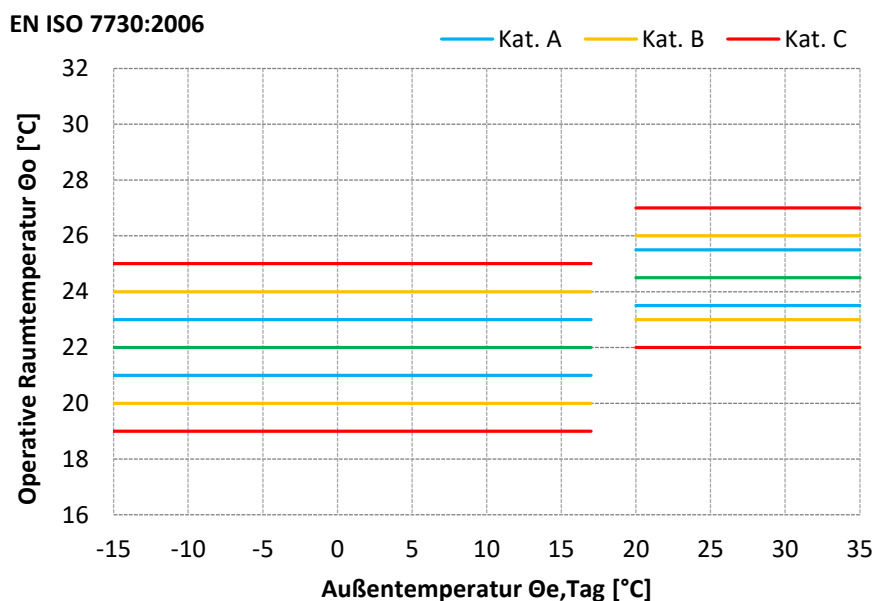


Abbildung 2-7: Temperaturgrenzen der Behaglichkeitskategorien A, B, C nach EN ISO 7730 (2006)

2.1.2 DIN EN 15251 (2007)

In der mittlerweile zurückgezogenen DIN 15251 ging es um Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden, bezogen auf Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik. Sie war vorrangig für nicht industriell genutzte Gebäude gedacht, in denen das Innenraumklima primär durch die menschliche Nutzung bestimmt werden. Anders als in der EN ISO 7730 (2006) werden hier keine Kriterien für lokale Unbehaglichkeitsfaktoren (Zugluft, Asymmetrie der Strahlungstemperatur, vertikale Temperaturunterschiede und Fußbodenoberflächentemperatur) vorgeschrieben. In den Angaben wird aber sehr wohl unterschieden zwischen Gebäuden mit und ohne maschineller Kühlung, wobei dies nach DIN 15251 wie folgt definiert ist: „Kühlung eines Raumes oder eines Gebäudes mit maschinellen Hilfsmitteln zur Kühlung der Zuluft durch z.B. Ventilator-konvektoren, gekühlte Oberflächen usw. Die Definition steht in Zusammenhang mit den von den Nutzern erwarteten Innentemperaturen während der warmen Jahreszeit. Das Öffnen von Fenstern am Tag und in der Nacht gilt nicht als maschinelle Kühlung. Als maschinelle Kühlung gilt hingegen jede maschinell unterstützte Lüftung.“

Das in Abbildung 2-8 dargestellte Temperaturfeld gilt für Gebäude ohne maschinelle Kühlanlagen, wobei an dieser Stelle gesagt sei, dass die im vorliegenden Projekt installierte Fußbodenkühlung auch keine maschinelle Kühlung ist. Definition dieser Norm darstellt. Die Angaben sind speziell für Räume, in denen Fenster leicht geöffnet werden können und in

2 Grundlagen

denen sich die anwesenden Personen kleidungstechnisch an die vorherrschenden thermischen Bedingungen anpassen können.

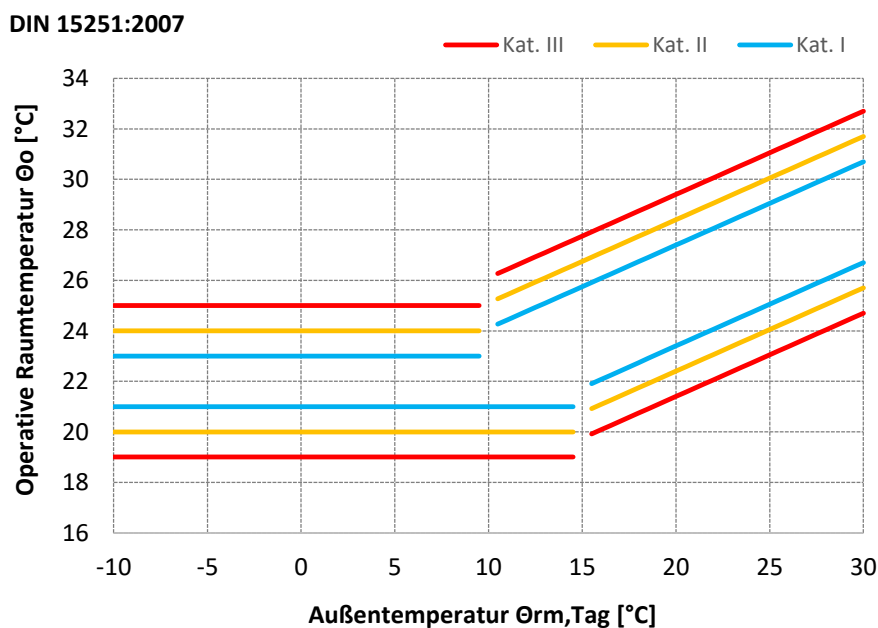


Abbildung 2-8: Temperaturgrenzen der Behaglichkeitskategorien I, II, III nach DIN 15251

Die in Abbildung 2-8 gezeigten Temperaturgrenzen basieren auf Untersuchungen in Büros, wobei die Arbeitsleistung nicht berücksichtigt wurde. Es wird jedenfalls die operative Raumtemperatur mit dem gleitenden Mittelwert der Außenlufttemperatur in Zusammenhang gebracht. Der gleitende Mittelwert der Außenlufttemperatur Θ_{rm} wird berechnet als:

$$\Theta_{rm,Tag} = (1 - \alpha)\Theta_{ed-1} + \alpha \Theta_{rm-1} \quad \text{Gl. 2-3}$$

α Konstante zwischen 0 und 1 (Std.: 0,8) [-]

$\Theta_{rm,Tag}$ Gleitender Mittelwert der Temperatur für den aktuellen Tag [°C]

Θ_{rm-1} Gleitender Mittelwert der Temperatur für den vorherigen Tag [°C]

Θ_{ed-1} Tagesmittelwert der Temperatur für den vorherigen Tag [°C]

Bis 10 °C (obere Kategoriegrenzen) bzw. 15 °C (untere Kategoriegrenzen) $\Theta_{rm,Tag}$ gelten Werte wie im Winterfall der EN ISO 7730 (2006). Für den Sommerfall werden die Kategoriegrenztemperaturen in Abhängigkeit des gleitenden Mittelwerts der Außenlufttemperatur ermittelt, wobei die zugrunde liegenden Formeln in Tabelle 2-5 angeführt sind. Die Bezeichnung Θ_i steht für die maximale bzw. minimale operative Raumtemperatur in der jeweiligen Kategorie. Die oberen Grenzwerte der Kategorien I, II und

2 Grundlagen

III gelten für gleitende Mittelwerte der Außenlufttemperatur zwischen 10 °C und 30 °C, die unteren für 15 °C bis 30 °C.

Tabelle 2-5: Grenzwerte der operativen Raumtemperatur nach DIN 15251

Kategorie I	oberer Grenzwert	$\theta_{i,max,I} = 0,33 \theta_{rm,Tag} + 18,8 + 2$	Gl. 2-4
	unterer Grenzwert	$\theta_{i,min,I} = 0,33 \theta_{rm,Tag} + 18,8 - 2$	Gl. 2-5
Kategorie II	oberer Grenzwert	$\theta_{i,max,II} = 0,33 \theta_{rm,Tag} + 18,8 + 3$	Gl. 2-6
	unterer Grenzwert	$\theta_{i,min,II} = 0,33 \theta_{rm,Tag} + 18,8 - 3$	Gl. 2-7
Kategorie III	oberer Grenzwert	$\theta_{i,max,III} = 0,33 \theta_{rm,Tag} + 18,8 + 4$	Gl. 2-8
	unterer Grenzwert	$\theta_{i,min,III} = 0,33 \theta_{rm,Tag} + 18,8 - 4$	Gl. 2-9

2.1.3 EN 16798-1 (2019)

Im Jahr 2019 wurde die in 2.1.2 erläuterte Norm durch die EN 16798-1 ersetzt, wobei eine ähnliche Anwendbarkeit gegeben ist. Die Unterschiede liegen allerdings bei der Angabe der zulässigen Abweichungen von einer sogenannten Komfort- bzw. optimalen operativen Raumtemperatur θ_c (vgl. Abbildung 2-9, grüne Linie), welche als solche in der Vorgängernorm nicht explizit erwähnt wird. Außerdem gelten die Grenztemperaturen im Sommerfall oben wie unten ab einem gleitenden Mittelwert der Außenlufttemperatur von 10 °C. Für den Winterfall gibt es für alle drei Kategorien nur eine fixe obere Grenze mit 25 °C, jedoch unterschiedliche konstante Untergrenzen, also 21 °C in Kategorie I, 20 °C in Kategorie II und 18 °C in Kategorie III.

2 Grundlagen

DIN 16798-1:2019

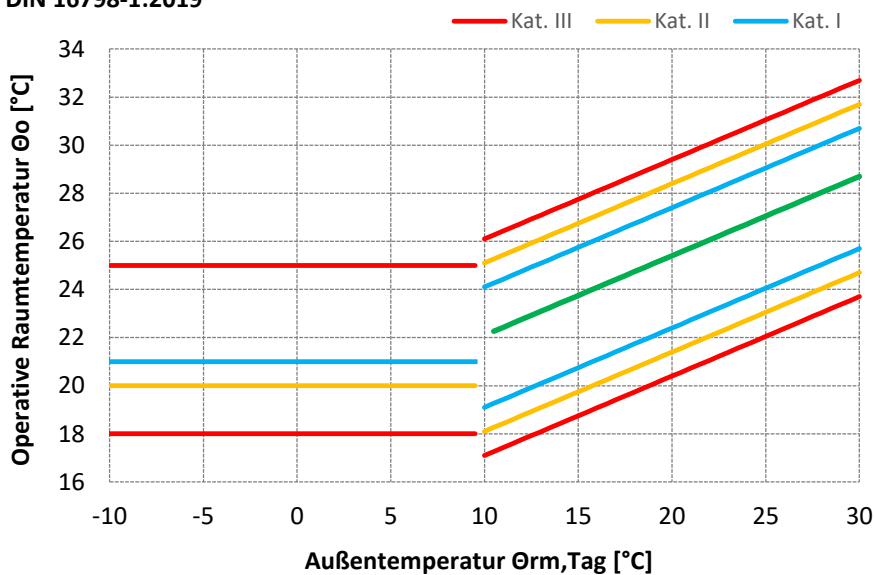


Abbildung 2-9: Temperaturgrenzen der Behaglichkeitskategorien I, II, III nach EN 16798-1

Die Berechnung der einzelnen Grenzwerte für den Sommerfall ist in Tabelle 2-6 gezeigt, die Berechnung der Komforttemperatur Θ_c erfolgt quasi wie die Ermittlung der Maximalwerte der operativen Raumtemperaturen. Die Formel dafür lautet:

$$\Theta_c = 0,33 \Theta_{rm,Tag} + 18,8 \quad \text{Gl. 2-10}$$

Tabelle 2-6: Grenzwerte der operativen Raumtemperatur nach EN 16798 (Sommerfall)

Kategorie I	oberer Grenzwert	$\Theta_{i,max,I} = 0,33 \Theta_{rm,Tag} + 18,8 + 2$	Gl. 2-11
	unterer Grenzwert	$\Theta_{i,min,I} = 0,33 \Theta_{rm,Tag} + 18,8 - 3$	Gl. 2-12
Kategorie II	oberer Grenzwert	$\Theta_{i,max,II} = 0,33 \Theta_{rm,Tag} + 18,8 + 3$	Gl. 2-13
	unterer Grenzwert	$\Theta_{i,min,II} = 0,33 \Theta_{rm,Tag} + 18,8 - 4$	Gl. 2-14
Kategorie III	oberer Grenzwert	$\Theta_{i,max,III} = 0,33 \Theta_{rm,Tag} + 18,8 + 4$	Gl. 2-15
	unterer Grenzwert	$\Theta_{i,min,III} = 0,33 \Theta_{rm,Tag} + 18,8 - 5$	Gl. 2-16

2.1.4 Zusammenhang zwischen Raumlufttemperatur und Raumluftfeuchte

In den aktuell geltenden Normen spielt die relative Raumluftfeuchte in Bezug auf die Behaglichkeit eine untergeordnete Rolle, wobei Dentel und Dietrich (2006) in ihrem Bericht das in Abbildung 2-10 gezeigte Diagramm als Zusammenfassung aller betreffenden Normen und Erkenntnisse präsentieren.

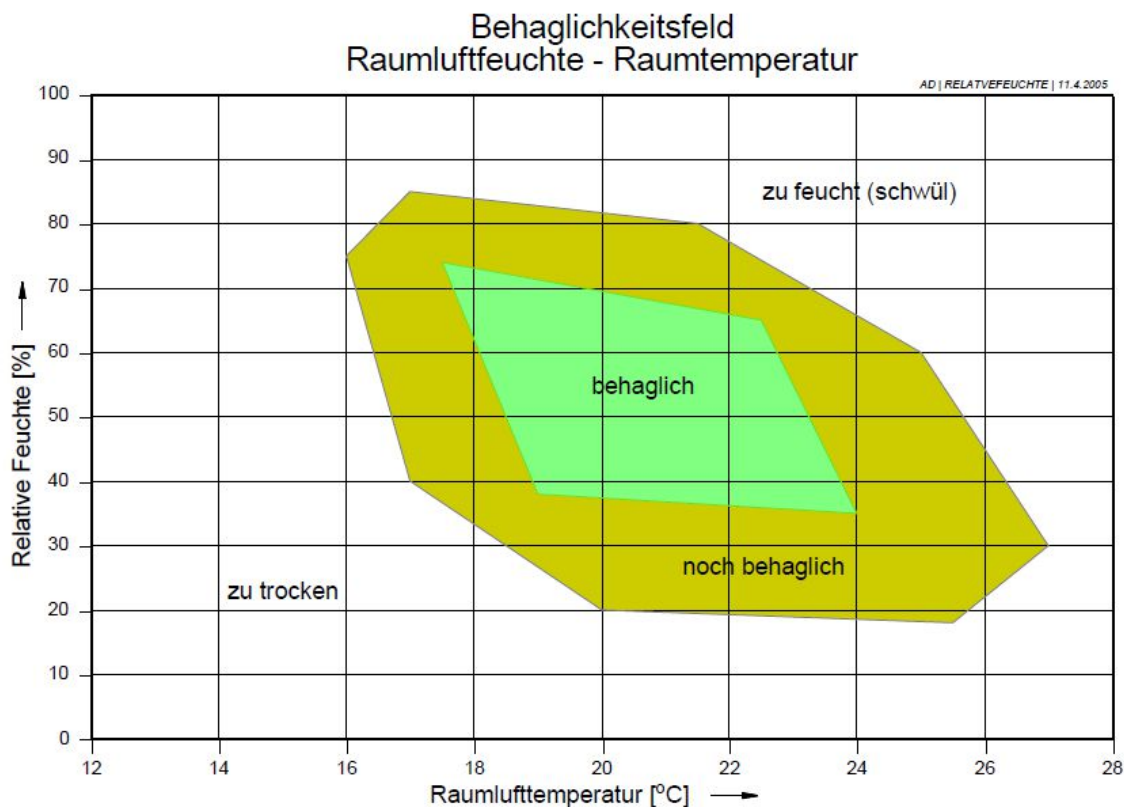


Abbildung 2-10: Behaglichkeitsfelder in Abhängigkeit der relativen Raumluftfeuchte (Dentel und Dietrich, 2006)

Die Angaben zu Behaglichkeit und relativer Raumluftfeuchte sind relativ einheitlich, ein angenehmes Raumklima stellt sich im Mittel bei 40-60% relativer Feuchte und 20 °C Raumtemperatur ein. Darunter wird die Luft als zu trocken empfunden, darüber als zu feucht (vgl. Abbildung 2-11).

2 Grundlagen

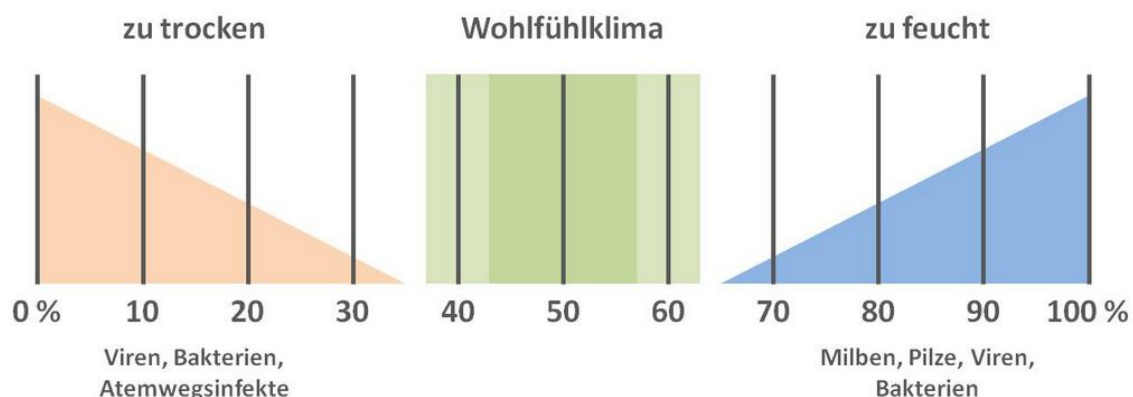


Abbildung 2-11: Behaglichkeitsbereiche in Relation zur relativen Raumluftfeuchte (energie-experten.org, 2020)

In den Normen DIN 15251 (2007) und EN 16798-1 (2019) wird angegeben, dass es normalerweise nur in besonderen Umgebungen (z.B. Museum, Reinraum, etc.) zu einer aktiven Be- und Entfeuchtung der Luft kommen muss, es aber jedenfalls zu bedenken gilt, dass das Maximum an absoluter Luftfeuchte 12 g/kg nicht überschreiten sollte. Wertet man diese Grenze in Abhängigkeit des in Graz vorkommenden Luftdrucks p (jahreszeitenabhängig) nach in Gl. 2-17 gezeigtem Zusammenhang aus, so ergibt sich je nach Raumlufttemperatur eine entsprechende zulässige relative Raumluftfeuchte. Die Raumlufttemperatur ist zu berücksichtigen, da der Sättigungsdruck des Dampfes p_s temperaturabhängig ist.

$$\varphi = x \frac{\frac{p}{p_s}}{x + \frac{R_{\text{Luft}}}{R_{\text{Dampf}}}} \quad \text{Gl. 2-17}$$

φ relative Luftfeuchte [-]

p Gesamtdruck [Pa]

p_s Sättigungsdampfdruck [Pa]

R_{Luft} Gaskonstante der Luft [J/(kgK)]

R_{Dampf} Gaskonstante für Wasserdampf [J/(kgK)]

x absolute Luftfeuchte [kg/kg]

Bei einer Raumlufttemperatur von 20 °C würde die obengenannte Obergrenze (12g/kg) für die absolute Luftfeuchte im Sommer (Luftdruck ~ 1030 Pa) eine relative Luftfeuchte von rund 84% erlauben, bei 26 °C ist man bei 58%. In den Normen hingegen erfolgt die Angabe der Be- und Entfeuchtungsgrenzen nach einer kategorischen Einteilung für „Räume, in denen die

2 Grundlagen

Feuchtekriterien durch die Belegung durch Personen bestimmt wurde“, die in Tabelle 2-7 dargestellt ist.

Tabelle 2-7: Relative Luftfeuchte - Be- und Entfeuchtungsgrenzen nach EN 16798-1 (2019)

	Entfeuchtung ab (Obergrenze)	Befeuchtung ab (Untergrenze)
Kategorie I	50%	30%
Kategorie II	60%	25%
Kategorie III	70%	20%

2.2 Flächenkühlung im Wohnbau

Immer öfter wird in neugebauten Niedrigenergiehäusern auf ein Flächenheizungssystem zurückgegriffen. Vergleicht man konventionelle Radiatoren mit Flächenheizungssystemen, so ist bei gleicher Wärmeleistung bei zweitgenannten aufgrund der großen Wärmeabgabefläche eine geringere Temperaturdifferenz zwischen der Heizfläche und der Raumluft notwendig, wodurch die Vorlauftemperatur wesentlich geringer ausfällt. Auch ist zu beobachten, dass diese Systeme immer öfter auch zur Raumkühlung eingesetzt werden, da solche Flächensysteme in der Regel eine hohe thermische Behaglichkeit im Raum herstellen. Wie bereits angeführt muss man bei der Verwendung solcher Systeme für den Sommerbetrieb auch einige Dinge berücksichtigen. Um etwa Kondensat zu vermeiden ist eine Taupunktunterschreitung nicht erwünscht, d.h. man kann das System nicht mit beliebig tiefer Vorlauftemperatur betreiben. Auch sind zu niedrige Fußbodentemperaturen nicht erstrebenswert, da dies auf Kosten der thermischen Behaglichkeit ginge (vgl. Kapitel 2.1). Flächenkühlungen können der Gruppe von thermoaktiven Bauteilsystemen zugeordnet werden, für die es aber nach Wimmer (2004) keine einheitliche Begriffsdefinition gibt. Koschitz und Lehmann (2000) interpretieren den Begriff so, dass darunter Bauteilsysteme fallen, die nicht mehr unter quasistationären Bedingungen ausgelegt werden können, da dies die vorhandene Speicherwirkung nicht berücksichtigen würde. Allgemeiner sieht Glück (1999) „alle Raumbegrenzungen, die sowohl stationär als auch instationär arbeitend zum Kühlen und Heizen des Raumes herangezogen werden“ als thermoaktive Bauteile an, weshalb auch die Fußbodenkühlung als ein solches thermoaktives Bauteil verstanden werden kann. Bei einer Fußbodenkühlung werden meist in den Estrich wasserführende Rohre (vgl. Abbildung 2-12) oder Kapillarrohrmatten verlegt, bei vorhandenem Durchfluss und wenn die Wassertemperatur kleiner als die Raumtemperatur ist wird dem Raum Wärme entzogen.

2 Grundlagen

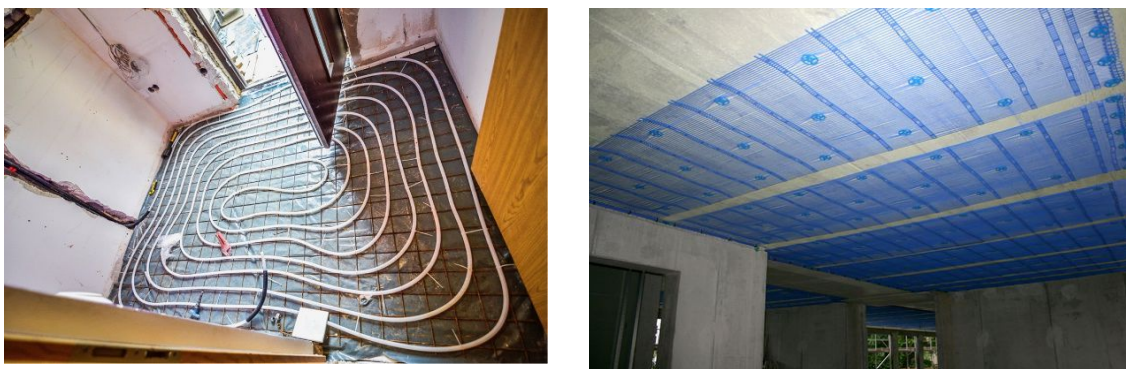


Abbildung 2-12: Mögliche Ausführungsarten (links: Hartmann, 2017, rechts: Bauke, 2020)

In der Literatur stößt man immer wieder auf eine Separierung in Systeme zur Komfortkühlung und Systeme zur Grundlastkühlung. Bei Erstgenannten wird zwar nicht die berechnete Kühllast abgedeckt, aber durch die trotzdem abgesenkte Raumlufttemperatur wird ein Komfortgewinn erzielt. Systeme zur Grundlastkühlung werden durch eine zusätzliche Anlage (z.B. Ventilator-konvektoren) ergänzt. Während das System selbst einen gewissen Anteil (Grundlast) abdeckt, werden die Peakleistungen vom Zusatzsystem reduziert.

Die Auslegung solcher Systeme erfolgt im Wesentlichen nach derselben Methodik wie bei Fußbodenheizungen, wobei der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Bodenoberfläche und Raum unterschiedlich ist. Olesen (2003) führt an, dass zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten die operative Raumtemperatur verwendet werden sollte, da diese auch z.B. zur Heizungsauslegung als Referenztemperatur herangezogen wird und generell die Wahl der Temperatur einen großen Einfluss auf die Höhe des Wärmeübergangskoeffizienten hat. Der Wärmefluss zwischen gekühltem Fußboden und Raum kann jedenfalls in einen konvektiven und radiativen Anteil unterteilt werden, man spricht von Konvektions- und Strahlungswärmeübertragung, wobei die Kühlung rein passiv, also z.B. ohne Verwendung eines Ventilators zur Luftbewegung, erfolgt. Es sind Kühlleistungen zwischen 20 und 50 W/m² erreichbar. Die mögliche Leistung ist von vielen Faktoren abhängig, wie z.B.:

- Fußbodenkonstruktion
- Bodenbelag (Holz, Fliese, Teppich)
- Verlegung der Rohre (Verlegetiefe, Verlegeabstand)
- Art des Systems (Rohr, Kapillarrohrmatte)
- Vorlauftemperatur

2 Grundlagen

Olesen (2003) gibt an, dass je nach Verlegeabstand (150 mm oder 75 mm) die mögliche Kühlleistung um bis zu 19 % steigt. Auch kann eine Verringerung der Überdeckung von 45 mm auf nur mehr 25 mm den Wärmeentzug aus dem Raum um 5% steigern. Prinzipiell wird angeraten eine maximale Temperaturspreizung zwischen Vorlauf und Rücklauf von 5 K nicht zu überschreiten. Eine vorgesehene Regelung der Vorlauftemperatur kann im Sommer durch eine taupunktgeführte Kühllastkurve, d.h. Vorlauftemperatur in Abhängigkeit des jeweiligen Taupunkts, ergänzt werden, wobei eine Erfassung der Vorlauftemperatur und der relativen Luftfeuchte im Raum erfolgt.

Der BVF verweist in der Richtlinie 11 (2015) auf die positiven Aspekte der Nutzung von Flächenheizungen auch als Kühlsystem. Mit diesen sei ein wirtschaftlicher und energieeffizienter Betrieb möglich, der zudem zu einer hohen thermischen Behaglichkeit führt. Im Kühlbetrieb ist ein Wärmeübergangskoeffizient von $7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ($11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ beim Heizen) vorhanden, der eine spezifische Kühlleistung von $30\text{-}40 \text{ W}/\text{m}^2$ (bis ca. $100 \text{ W}/\text{m}^2$ beim Heizen) ermöglicht.

Die Kondensationsproblematik ist u.a. davon abhängig, welches raumumfassende Bauteil gekühlt wird. Tang et al. (2016) haben für konstante Raumbedingungen (Raumlufttemperatur $33 \text{ }^\circ\text{C}$, Raumlufteuchte 60%) die Kondensationsraten von Decken-, Wand- und Bodenkühlungen experimentell ermittelt. Diese kennzeichnen, wieviel Masse an Wasserdampf je Zeiteinheit durch Wärmeentzug zu flüssigem Wasser umgesetzt wird. Bei radiativer Kühlung ist der Einbau im Boden jener mit den geringsten Kondensationsraten, was bedeutet, dass unter denselben Bedingungen der Kondensatausfall an vertikalen Wänden wesentlich schneller geschieht als am Boden. Von Zarella et al. (2014) aber auch von anderen wird bei der Verwendung von Flächenkühlungen generell eine mechanische Be- und Entlüftung oder eine gesteuerte Entfeuchtung der Raumlufteuchte empfohlen, da durch das Kontrollieren der Raumlufteuchte Kondensation an konditionierten Flächen fast gänzlich ausgeschlossen werden kann. Je geringer die Temperatur ist, umso weniger Wasser kann Luft aufnehmen und umso leichter kann es zu Kondensation kommen, was eben darum besonders im Kühlfall ein Problem darstellen kann. Aber auch die generellen Feuchtelasten im Raum bzw. in der Wohnung können dies verstärken, bzw. kann ein falsches Verhalten des Nutzers auch zu einer Verschlechterung der Problematik beitragen. Die Höhe der anfallenden Feuchtelasten in einer Wohnung ist nicht zu unterschätzen. Neben den Bewohnern, die durch Verdunstung über die Haut versuchen ihre Körpertemperatur konstant zu halten, gibt es noch andere relevante Feuchtequellen (wie z.B. Aquarien, Pflanzen, Wäsche trocknen lassen, etc.). Rieberer (2016) spricht in seiner Vorlesung von rund 11 kg Wasser pro Tag und Haushalt, wobei von einer Belegung mit vier Personen ausgegangen wird, bei Zürcher, et al. (2018) geht man sogar von bis zu 12 kg pro Tag aus. Allein während des Tages stößt der Mensch in etwa $1\text{-}4 \text{ kg}$ Wasser aus, im Schlaf etwa 1 kg . Die detaillierten Annahmen zu den in dieser Arbeit

2 Grundlagen

verwendeten Feuchtelasten sind Kapitel 3.3 zu entnehmen, aber das Bestehen der Notwendigkeit für regelmäßiges Lüften (Austausch mit trockenerer Außenluft) soll durch diese Zahlen erneut untermauert werden, da einerseits der gekühlte Fußboden als Risikofläche für Kondensation gilt, aber andererseits generell die Wahrscheinlichkeit der Schimmelbildung steigt.

Hinsichtlich der Schimmelpilzbildung sei erwähnt, dass die Kriterien dafür sehr vielschichtig sind. Parkett, also Holzboden, gilt prinzipiell als guter Nährboden. Wie bei Sedlbauer et al. (2003) nachzulesen, spielen Temperatur und Feuchte eine entscheidende Rolle, aber auch das Substrat, also der dem Pilz zur Verfügung gestellte Nährstoff hat großen Einfluss. Auch der Faktor Zeit bzw. Häufigkeit des Auftretens guter Wachstumsbedingungen sind entscheidend. Zur Beurteilung des Schimmelpilzrisikos unter Berücksichtigung all dieser Größen müsste eine hygrische Simulation (z.B. mit WUFI©, Fraunhofer Institut für Bauphysik) durchgeführt werden.

2.3 Verwendung von Parkettböden bei aktivierten Fußböden

Der in den Gebäuden von Smart City Mitte verwendete Parkettboden besteht aus einer dünneren Nuttschicht aus Eiche und einer tragenden Schicht aus Fichte mit stehenden Jahresringen (vgl. Abbildung 2-13, links), was ein geringeres Quell- und Schwindmaß bedeutet als bei liegenden Jahresringen (vgl. Abbildung 2-13, rechts). Timm et al. (2019) erklären, dass dies den Mechanismen entspricht wie Holz auf Feuchteänderung reagiert bzw. was auch als „Arbeiten“ des Werkstoffes bezeichnet wird. Bei Feuchteabgabe zieht sich der Werkstoff zusammen (= Schwinden), wohingegen bei einer Zunahme der Feuchte das Bauteil zum Ausdehnen neigt (= Quellen).

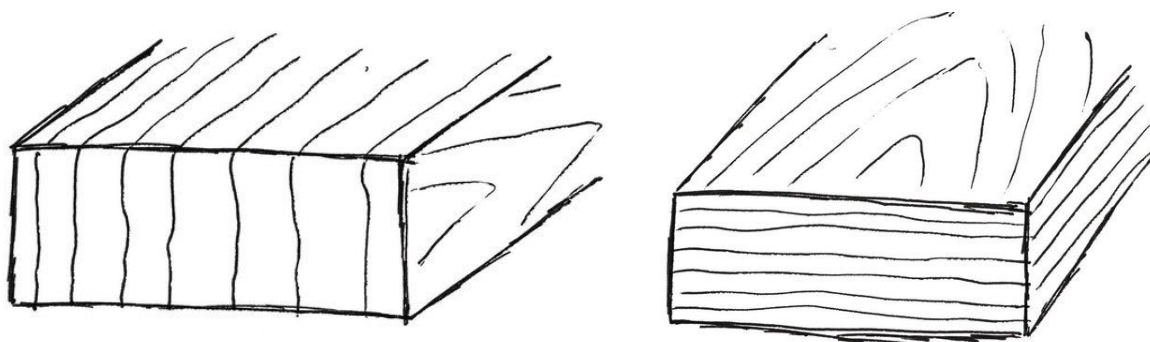


Abbildung 2-13: Sortierqualität eines Holzwerkstoffes (Rech, 2016)

Diese Vorgänge geschehen anisotropisch, je nach Faserrichtung und sind bei den unterschiedlichen Holzarten unterschiedlich stark ausgeprägt. Der bei diesem Parkett verwendete Trägerwerkstoff Fichte ist hinsichtlich Quellen und Schwinden jedenfalls deutlich träger als beispielsweise Buche. Auch bei spannungsfreiem Einbau, d.h. unverklebt mit Platz

2 Grundlagen

in den Randbereichen, ist die über den Querschnitt nicht gleichmäßige Feuchteeinwirkung zu berücksichtigen. Aber da auch das Aufstellen von Mobiliar eine Behinderung von gleichmäßigem Schwinden und Quellen darstellt, wird in der Praxis i.d.R. eine Verklebung vorgesehen, da diese dem Verwölben des Parketts entgegenwirkt. Den Empfehlungen von Weitzer Parkett im Merkblatt MB010 (2012) zufolge, ist während des ganzen Jahres ein Raumklima von 20 °C und 50% relativer Luftfeuchte einzuhalten, um mögliche Dimensionsänderungen zu minimieren, wobei nach DIN 15251 (2007) ein gesundes Raumklima eine jahreszeitliche Schwankung der Luftfeuchte zwischen 30% und 65% aufweisen darf. In diesem Bereich ist dann mit holztypischen Erscheinungen wie Rissen o.ä. in eher geringem Ausmaß zu rechnen, eine längerfristige Abweichung ist nicht zu empfehlen. Einerseits kann es zu gesundheitsschädlicher Schimmelbildung aber auch größeren Rissen und Fugen führen. Dies gilt jedenfalls für länger andauernde Überschreitungen, kurzfristige von 5-10% können ausgeglichen werden und stellen somit kein Problem dar. Bei der Ausführung einer Fußbodenkühlung ist ein Auftreten von relativen Luftfeuchten im Bereich des Fußbodens von über 65% jedenfalls zu vermeiden. Ein Abkühlen sollte stufenweise erfolgen, sodass zwischen Raumluft- und Fußbodenoberflächentemperatur ein maximaler Unterschied von 2 bis 3 K vorhanden ist.

Auch Pitt (2019) weist darauf hin, dass Fußbodentemperaturen die zu einer relativen Luftfeuchte von 75% an der Fußbodenoberfläche führen für die problemfreie Verwendung einer Fußbodenkühlung mit Parkett als Werkstoff keinesfalls zulässig sind. Ein Temperaturunterschied von etwa 4 K zwischen Raumluft und Fußbodenoberfläche ist auch kurzfristig nicht zu tolerieren und er empfiehlt die Verwendung eines Taupunktjägers. Pitt führt außerdem die „10 Gebote erfolgreicher Fußbodenkühlung“ an, wobei die wichtigsten Punkte im Folgenden zusammengefasst sind.

1. Die Fußbodenkühlung darf erst bei Raumlufttemperaturen von 26 °C einschalten bzw. sollte sie sich darunter abschalten
2. Es ist anzustreben, dass die Fußbodenkühlung maximal 21 Tage im Jahr arbeiten sollte
3. Ein durchgehender Betrieb der Fußbodenkühlung von mehr als zwei Wochen am Stück ist generell zu vermeiden.
4. Im Kühlbetrieb sollte die Fußbodentemperatur nicht mehr als 2-3 Grad unter der Raumtemperatur liegen.
5. Die Temperaturen des Raumes und des Bodens sind mithilfe von Messgeräten zu kontrollieren und der Einbau eines Temperatur- und Feuchteloggers mit akustischer Warnfunktion in den Fußboden ist dringend zu empfehlen.

6. Maximal 30% der Parkettfläche dürfen durch Teppiche und/oder Möbel mit geringem Bodenabstand verstellt werden.

2.4 Beschreibung des Mehrzonengebäudemodells in TRNSYS (2017)

In der vorliegenden Arbeit wird ein thermisches Gebäudemodell in der Simulationsumgebung TRNSYS (2017) von Solar Energy Lab verwendet. TRNSYS (Transient System Simulation Program) wird im Handbuch wie folgt beschrieben: *„TRNSYS ist eine vollständige und erweiterbare Simulationsumgebung für die transiente Simulation von Systemen, einschließlich Mehrzonengebäuden. ... TRNSYS-Simulationen werden erstellt, indem einzelne Komponentenmodelle (sogenannte Types) zu einem vollständigen Modell zusammengefügt werden.“*

Hiller und Schulz (2015) beschreiben es als *„modular aufgebaute sehr flexible Simulationsumgebung, deren Einsatzmöglichkeiten von der dynamischen Berechnung einer einfachen thermischen Solaranlage bis hin zu komplexen Gebäuden und Systemen zur rationellen Energienutzung reichen. ... Es können das Raumklima sowie der Energiebedarf für ein Gebäude in Abhängigkeit des Standortes, der Hüllflächenqualität, des Lüftungskonzeptes und der Anlagentechnik vorausberechnet werden. Die Berechnung solarer Gewinne sowie die detaillierte Berücksichtigung des langwelligen Strahlungsaustausches und des thermischen Speicherverhaltens der Bauteile erlaubt eine fundierte Bewertung des thermischen Komforts in Gebäuden.“*

Sie führen weiter aus, dass die offene und modulare Struktur eines der wichtigsten Merkmale darstellt, kann der Nutzer so einzelne Komponenten zu einem System zusammenfügen. Die Gestaltung der Simulation erfolgt im Simulation Studio, dessen Gestalt beispielsweise Abbildung 2-14 entnommen werden kann.

2 Grundlagen

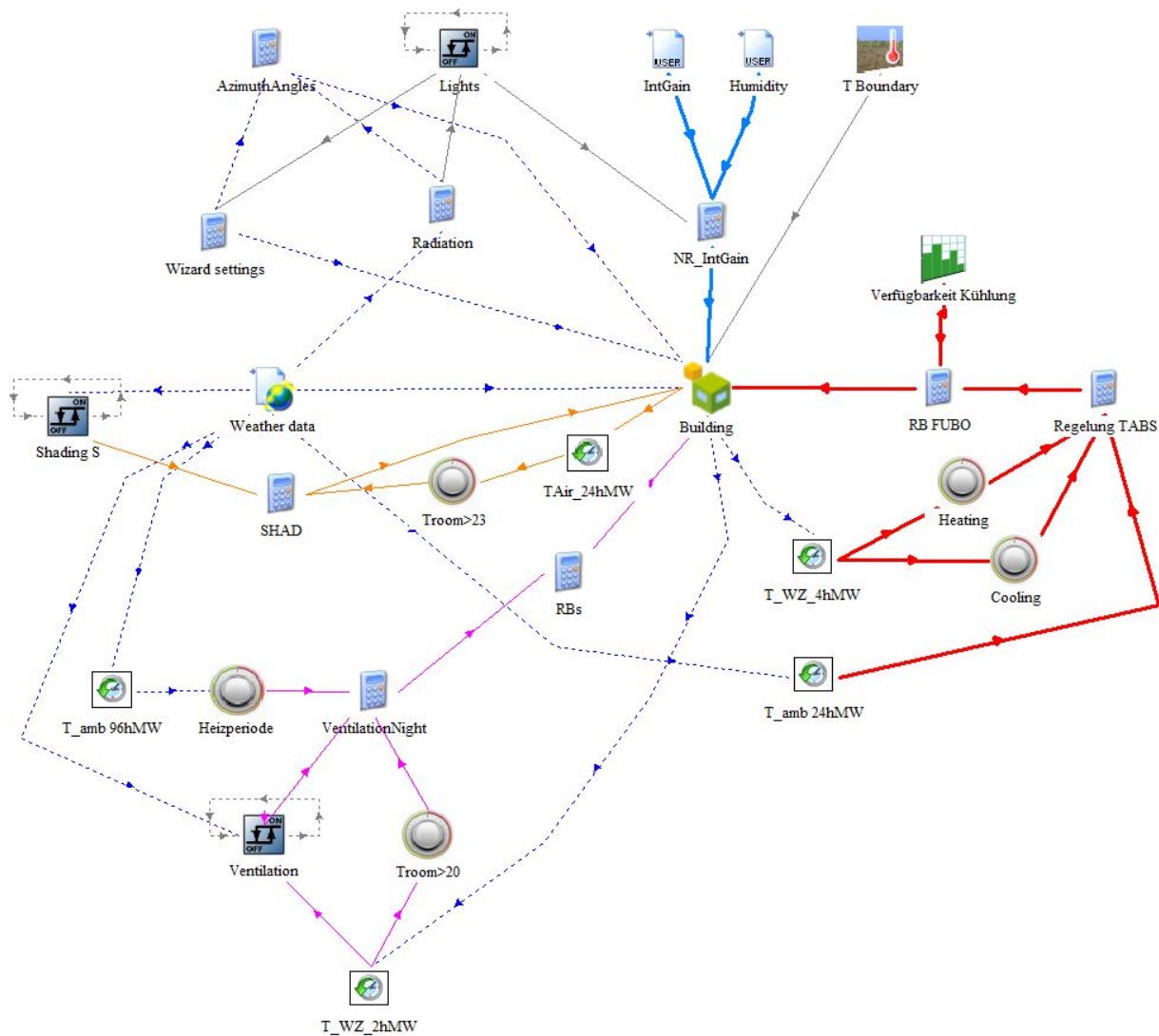


Abbildung 2-14: Simulationsoberfläche im Simulation Studio von TRNSYS (2017)

Der für eine Gebäudesimulation notwendige Type 56 (Mehrzonengebäudemodell) ist in Abbildung 2-14 ungefähr in Bildmitte grün dargestellt und mit „Building“ beschriftet. Hiller und Schulz (2015) führen folgende Merkmale an, die diesen Type auszeichnen:

- beliebig viele gekoppelte thermische Zonen
- beliebig viele Wände/Fenster mit frei definierbarem Aufbau (Verglasungsbibliothek)
- thermoaktive Bauteile wie Betonkernaktivierung, Fußbodenheizung und -kühlung, Kapillarrohrmatten und Kühldecken
- variable interne konvektive und radiative Wärmelasten, wie z.B. Personen, Kunstlicht, Geräte, etc.
- detailliertes Fenstermodell mit variablen Sonnenschutzeinrichtungen
- Berücksichtigung von Fremd- oder Eigenverschattung

2 Grundlagen

- Kurz- und langwellige Strahlungsmodelle mit verschiedenem Detaillierungsgrad
- interzonaler Luftwechsel
- natürliche und mechanische Lüftung
- integrierte Luftheizung und –kühlung
- Feuchteberechnung
- interne/externe Regelstrategien für Sonnenschutz, Lüftung, Heizung und Kühlung
- lokale Komfortbewertung nach EN ISO 7730 (2006)
- große Anzahl an möglichen Ausgabegrößen, wie z.B. Luft- und Oberflächentemperaturen, Leistungen, Energiemengen, etc.

Um all diese Merkmale auch berücksichtigen zu können, ist eine eigene Oberfläche, genannt TRNBuild, im Programmpaket enthalten, in der alle relevanten Einstellungen getroffen werden können und es gibt die Möglichkeit das Gebäude zonenweise in 3D mit Sketch Up (2017) zu modellieren, um es in weiterer Folge in TRNBuild via Plug-in zu importieren. Dadurch werden automatisch die Ausrichtung des Gebäudes, sämtliche Hüll- und Außenflächen mit ihren Bruttomaßen erfasst und auch transparente Flächen (z.B. Fenster) werden erkannt. Die Zuweisung der entsprechenden Wandaufbauten bzw. des detaillierten Fensteraufbaus erfolgt entweder bereits in Sketch Up oder danach in TRNBuild, wobei nur hier ein Ändern des Aufbaues selbst erfolgen kann.

Ebenfalls bei Hiller und Schulz (2015) zu lesen ist, dass es sich bei diesem Modell um ein Energiebilanzmodell handelt. Jede thermische Zone wird durch einen Luftknoten repräsentiert, der ein komplett durchmischtes Luftvolumen mit einer gleichförmigen Temperatur beschreibt. Das Luftvolumen wird durch opake und transparente Flächen begrenzt, wobei Wärmeleitung und die Speicherfähigkeit der thermischen Masse berücksichtigt werden. Bei der kurzwelligen Strahlungsverteilung werden alle Innenflächen der thermischen Zone mitberechnet, standardmäßig gilt dies auch für den langwelligen Strahlungsaustausch. Neben der Energiebilanz wird auch eine Berechnung der Feuchtebilanz je Luftknoten durchgeführt, latente Wärmeströme in oder aus dem Luftknoten werden ermittelt.

Die auf die Außenflächen eintreffende kurzwellige Strahlung wird an den Luftknoten weitergeleitet, wobei der Anteil an transparenten Flächen, die Effektivität des Sonnenschutzes und die thermische Qualität der Bauteile den weitergeleiteten Anteil beeinflussen.

Bei der Berücksichtigung der eintreffenden langwelligen Strahlung sind für die Außenflächen die effektive Himmelstemperatur und die effektive Bodentemperatur von Bedeutung. Bezüglich dem Strahlungsaustausch der Innenflächen können zwei unterschiedliche Modelle

2 Grundlagen

verwendet werden, ein detailliertes oder wie in diesem Fall das Standardmodell (vgl. Abbildung 2-15). Der künstliche „Temperaturknoten“ T_{Stern} steht mit allen Innenflächen über Strahlung und Konvektion im Austausch, wobei der Luftknoten der thermischen Zone nur über einen Widerstand mit diesem Sternknoten gekoppelt ist und nicht direkt mit den Innenflächen. T_{Luft} steht in Abbildung 2-15 für die Raumlufttemperatur.

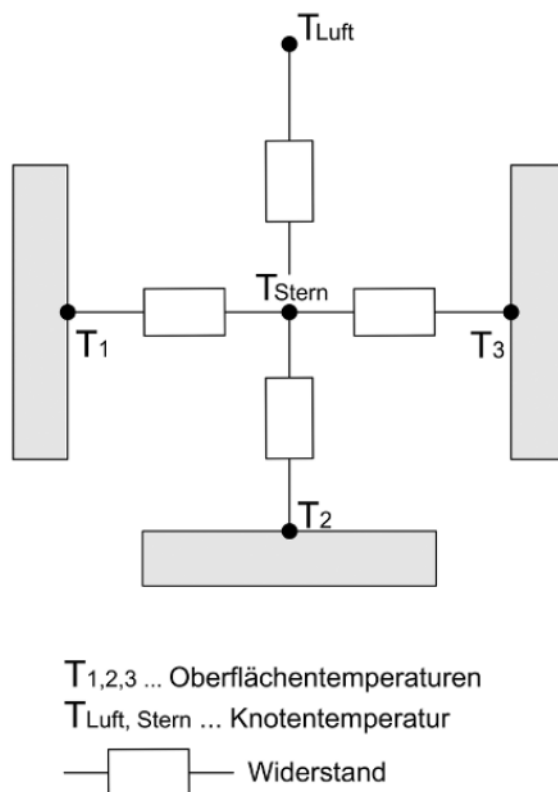


Abbildung 2-15: Sternmodell (Hiller und Schulz, 2015)

Bei internen Wärmeströmen erfolgt eine Unterscheidung zwischen dem radiativen (langwellig) und dem konvektiven Anteil, wobei z.B. auch bei der Eingabe der internen Lasten beide Anteile getrennt angeführt werden, da sonst eine korrekte Wirkweise nicht gut abgebildet wird. Der konvektive Anteil wird an den Luftknoten selbst gekoppelt, der radiative wird direkt an die Hüllflächen des Luftknotens abgegeben. Bei konvektiven Wärmeströmen verhält es sich so, dass diese über den Luftaustausch mit unterschiedlichen Quellen bzw. dem konvektiven Wärmetransport von inneren Wärmequellen entstehen und den Luftknoten direkt beeinflussen. Da dieser in der Regel eine geringe Wärmekapazität aufweist kann es dadurch zu einer schnellen Änderung der Lufttemperatur (vgl. Abbildung 2-16, T_{air}) im Knoten kommen.

Es werden in einem Luftknoten folgende konvektive Wärmeströme erfasst, die in Abbildung 2-16 dargestellt sind:

- über Undichtheiten ($Q_{\text{inf},i}$)

2 Grundlagen

- Lüftungswärmeströme ($Q_{\text{Vent},i}$)
- durch Luftaustausch mit angrenzenden Zonen ($Q_{\text{Coupl},i}$)
- von den zugehörigen Innenflächen ($Q_{\text{Surf},i}$)
- interne Wärmequellen ($Q_{g,c,i}$)
- infolge einer integrierten Heizung bzw. Kühlung ($Q_{\text{heat}}, Q_{\text{cool}}$)
- durch Hinterlüftung des Sonnenschutzes ($Q_{\text{ishcc},i}$)
- bzw. durch solaren Wärmegewinn der Luft ($Q_{\text{solar},i}$)

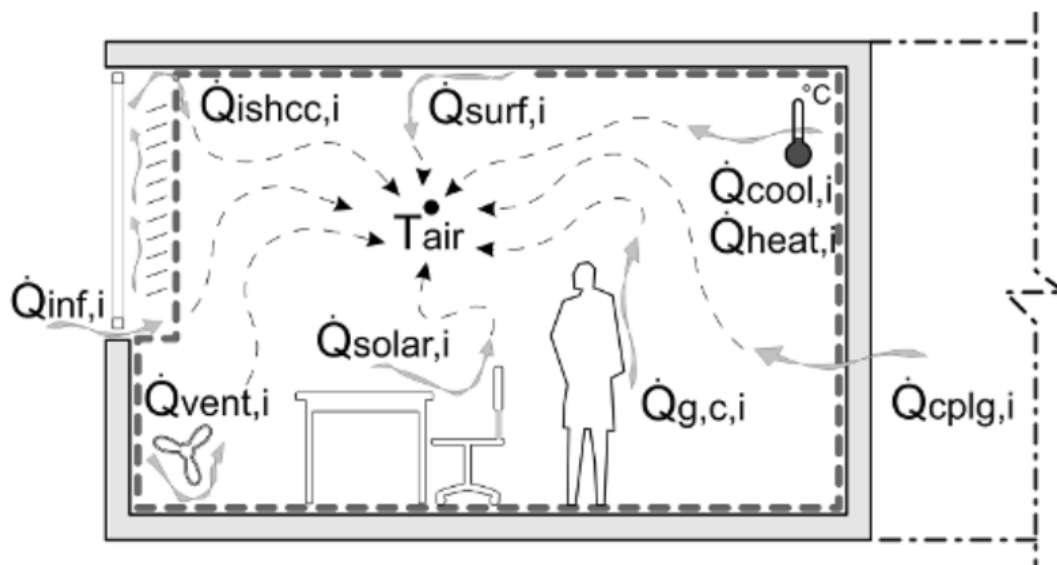


Abbildung 2-16: Unterschiedliche Wärmeströme eines Luftknotens (Hiller und Schulz, 2015)

Konvektive Wärmeströme zwischen den angrenzenden Bauteilen und der Luft sind bestimmt durch die Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche und dem Luftknoten, der Fläche selbst, also den m^2 , und dem Wärmeübergangskoeffizienten, welcher von der Art der Strömung abhängt (laminar, turbulent bzw. freie oder erzwungene Konvektion). Dieser kann für jedes Bauteil als fixer Wert angegeben werden, oder aber er wird durch eine interne Kalkulation ermittelt, in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz, der Lage des Bauteils und der Richtung des Wärmestroms.

Bei der Modellierung opaker Bauteile ist vor allem die Wärmeleitung und deren Speicherung von entscheidender Bedeutung. Die Unterscheidung der auftretenden Schichttypen erfolgt nach:

- thermisch massiven Schichten mit Wärmespeicherfähigkeit (z.B. Beton)
- masselose Schichten, also sehr dünnen oder leichten Schichten mit vernachlässigbarer Wärmespeicherfähigkeit (z.B. Putz oder Dämmschichten)

2 Grundlagen

- thermoaktiven Schichten, welche einem massiven Bauteil Energie zu- bzw. abführen (z.B. Fußbodenkühlung)
- flächige Kühldecken

Bei erstgenannten erfolgt die Beschreibung durch deren Schichtdicke, Wärmeleitfähigkeit, Dichte und Kapazität. Zweitgenannte werden lediglich durch einen thermischen Widerstand dargestellt.

Sind in einer Simulation mehrere thermische Zonen enthalten, so sind dementsprechend viele Bauteile (Wände) zu berücksichtigen. Zur Berechnung des Wärmeaustausches zwischen zwei thermischen Zonen die durch eine gemeinsame Wand getrennt sind wurde bei der Entwicklung des Mehrzonenmodells die sogenannte Übergangsfunktion (transfer function) implementiert. Diese ermittelt den Wärmetransport durch eine Trennwand von der Wandoberfläche der einen thermischen Zone zur Wandoberfläche einer angrenzenden thermischen Zone (vgl. Abbildung 2-17).

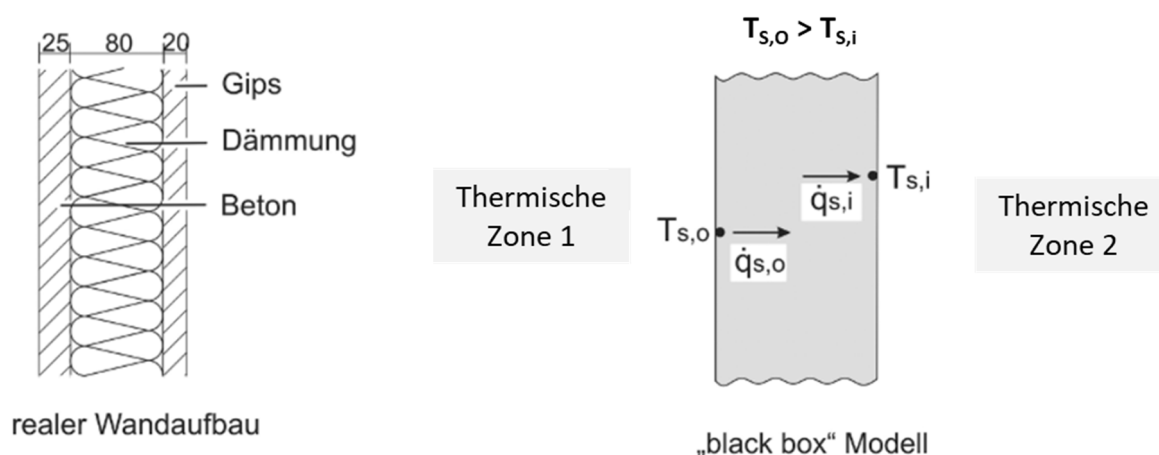


Abbildung 2-17: Modellierung opaker Bauteile in TRNSYS (Hiller und Schulz, 2015)

Wie in Abbildung 2-17 zu sehen, wird dazu das Bauteil, bzw. die Wand, als „black box“ betrachtet, die allein durch die Temperaturen an der Oberfläche und den zugehörigen Wärmeströmen an Wandinnen und -außenseite definiert ist. Die dem Bauteil zugeordnete thermische Kapazität, definiert durch Dichte und spezifische Wärmekapazität, wird durch die oben angeführte Transferfunktion berücksichtigt, wobei diese für konstante Zeitschritte gelöst wird. Bei der Abbildung von thermoaktiven Bauteilen, wie z.B. einer Fußbodenkühlung, ist ein leistungsfähiges Modell direkt in das Gebäudemodell integriert, welches im folgenden Kapitel näher beschrieben wird.

2.4.1 Modellierung der Flächenkühlung in TRNSYS (2017)

Die Simulationsumgebung TRNSYS hat das von Koschencz und Lehmann (2000) beschriebene Modell im mehrzonigen Gebäudemodell Type 56 integriert. Es handelt sich dabei um eine Methode, durch die das dreidimensionale, instationäre Wärmeleitungsproblem mittels einer eindimensionalen Berechnung angenähert wird, wobei geringfügige Einschränkungen getroffen werden müssen, wodurch eine Berechnung von Rohrsystemen in Wandaufbauten möglich gemacht wird. Die zur Modellierung notwendigen Größen sind in Abbildung 2-18 gezeigt. Diese sind notwendig, um den Einfluss der im Bauteil enthaltenen Rohre je Zeitschritt in gleichwertige thermische Widerstände umzurechnen, die wiederum einen Zusammenhang zwischen der Vorlauftemperatur im Rohr und der mittleren Temperatur des Bauteils in der Rohrebene herstellen.

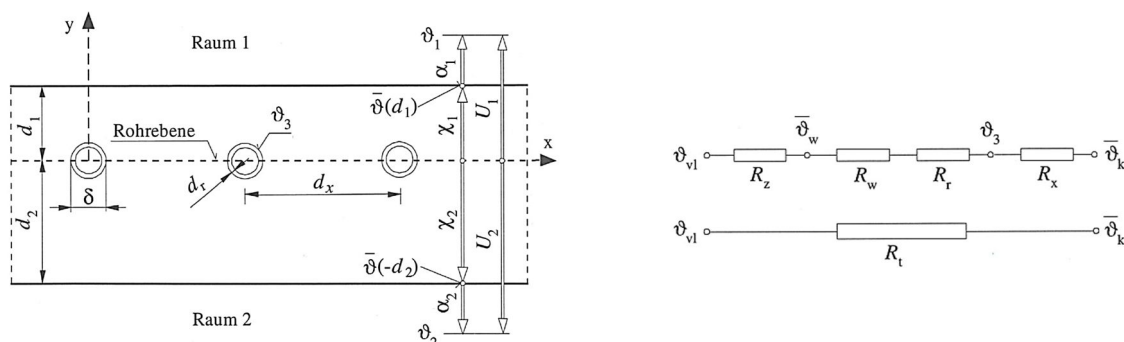


Abbildung 2-18: Aufbau des Active Layer Modells von Koschencz und Lehmann (2000)

In der Rohrebene liegt real eine ungleichmäßige Temperaturverteilung vor. Dies ist primär bedingt durch die Abnahme der Temperatur des Trägermediums vom Eintritt bis zum Systemaustritt (Heizfall: $T_{\text{ein}} > T_{\text{aus}}$, Kühlfall: $T_{\text{ein}} < T_{\text{aus}}$) und auch durch die Verlegung der Rohrleitung (paralleler Verlauf der Rohrleitungen, Schleifen im Außenbereich der Rohrleitungen). Dem Modell liegt die Annahme zu Grunde, dass die Temperatur in der Rohrebene (x - z Ebene, Abbildung 2-18) überall gleich groß ist, wobei der Widerstand R_x eine Mittelung der Temperatur entlang der x -Achse beschreibt. Unter Einhaltung der Bedingungen $d_1/d_x \geq 0,3$ bzw. $d_2/d_x \geq 0,3$ und $\delta/d_x \leq 0,2$ kann R_x berechnet werden, der die Wärmetransportprozesse zwischen dem Bauteilmaterial und dem Rohr berücksichtigt. Dieser hängt vom Verlegeabstand, dem Außenrohrdurchmesser und der Wärmeleitfähigkeit in der Rohrebene ab. Der Wärmeübergang erfolgt konvektiv vom Fluid zur Rohrwand (R_w) und durch Wärmeleitung durch die zylindrische Rohrwand (R_r) und die exponentielle Temperaturänderung des Fluids entlang der z -Achse (Durchflussrichtung) wird durch den Widerstand R_z dargestellt. Die Wärmeleistung wird berechnet als Differenz der Vorlauftemperatur ϑ_{vl} und der mittleren Temperatur in der Rohrebene $\bar{\vartheta}_k$ dividiert durch den thermischen Gesamtwiderstand R_t (vgl. Gl. 2-18).

$$\dot{q} = \frac{1}{R_t} (\vartheta_{VL} - \bar{\vartheta}_k)$$

Gl. 2-18

Die Fluidtemperatur entlang der Rohrleitung wird mit Hilfe einer linearen Funktion approximiert. Wenn ein geringer Massenstrom vorherrscht, die Rohrabstände zu klein sind oder die übertragene Leistung über die Rohrlänge zu hoch ist kann es vorkommen, dass die berechnete Rücklauf­temperatur unter die Kerntemperatur in der Rohrebene abkühlt. Um dies zu verhindern wird die Rohrleitung in Strömungsrichtung in Teilstrecken unterteilt um den Temperaturabfall je Teilstrecke zu begrenzen (Funktion: divide surface). Für das jeweils erste Element ist ein Massenstrom und eine Vorlauf­temperatur anzugeben, die Flächen werden hintereinander gerechnet und für die letzte Fläche wird die Austrittstemperatur (Rücklauf­temperatur) ausgegeben.

Im Programm ist es notwendig eine solche Rohrleitungsschicht als sogenannten „active layer“ zu modellieren. Dieser ist im Wandaufbau in TRNSYS definiert durch das durchströmende Fluid (Angabe der spezifischen Wärmekapazität in kJ/(kgK), Massenstrom in kg/h) und je nach vorhandener Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf wird dem angrenzenden Luftknoten (TRNSYS modelliert Räume als Luftknoten) Wärme zugeführt (Fußbodenheizung) oder vom Luftknoten Wärme abgeführt (Fußbodenkühlung).

2.4.2 Feuchtemodelle in TRNSYS (2017)

Hinsichtlich der Forderung nach Kondensationsfreiheit in und am Boden ist es notwendig die hygri­schen Randbedingungen möglichst genau zu treffen. Beim verwendeten Bodenbelag handelt es sich um ein poröses Material, bei dem die Feuchtetransportvorgänge, wie Zillig (2009) in seiner Dissertation festhält, sehr komplex sind. Es kommt sowohl auf die aktuell herrschenden Bedingungen, aber auch auf die „Geschichte“, also wieviel Wasser bereits gespeichert wurde, an. In Abbildung 2-19 ist das Sorptionsverhalten von Fichtenholz bei einer Temperatur von 23 °C gezeigt. Die Sorptionsisotherme hat je nach Temperatur eine andere Gestalt. Weiters ändert sich die aufnehmbare massenbezogene Wassermenge in Abhängigkeit der relativen Raumluftfeuchte und es ist ein Unterschied zu sehen, ob man sich im Bereich der Wasseraufnahme (Adsorption, rote Linie) oder der Wasserabgabe (Desorption, blaue Linie) befindet.

2 Grundlagen

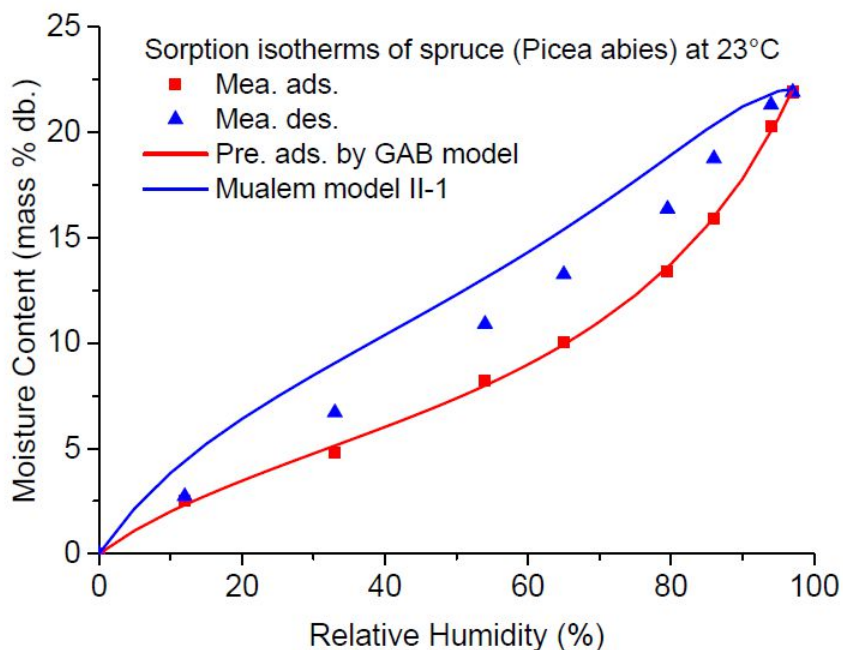


Abbildung 2-19: Sorptionsisotherme von Fichtenholz bei 23 °C (Zhang, et al. (2015))

Eine zusätzliche Rolle hinsichtlich des Feuchteverhaltens eines Baustoffes spielt der Wasserdampfdiffusionswiderstand μ . Dabei handelt es sich um eine dimensionslose Kennzahl die angibt, um wievielfach der Widerstand des Baustoffes gegen Wasserdampfdiffusion größer ist im Vergleich zu einer gleich dicken Schicht ruhender Luft bei konstanter Temperatur. Auch hier gilt es zu beachten, dass die Werte in einem breiten Bereich streuen können, je nachdem wie trocken bzw. feucht der betrachtete Baustoff ist. Einige Werte für unterschiedliche Baustoffe sind in Tabelle 2-8 angeführt.

Tabelle 2-8: Werte für den Wasserdampfdiffusionswiderstand verschiedener Baustoffe nach Willems et al. (2006)

Baustoff		Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ [-]	
		trocken	feucht
Dämmstoffe	Mineralwolle	1	1
	Expandierter Polystyrolhartschaum	60	60
	Schaumglas	praktisch dampfdicht	
	Holzwolle-Leichtbauplatten	5	3
Putze und Mörtel	Gipsputz	10	6
	Kalk, Sand	10	6
	Zement, Sand	10	6

TRNSYS (2017) bietet im Gebäudemodell zwei unterschiedliche Modelle zur Berechnung der Raumluftfeuchte an, einerseits ein einfaches Kapazitätenmodell, andererseits ein

2 Grundlagen

detaillierteres, in dem eine oberflächennahe Feuchtespeicherung und ein Feuchtetiefenspeicher berücksichtigt werden. Beide Modelle sind Teil des Mehrzonenmodells (Type 56) von TRNSYS (2017).

a) Effective Capacitance Humidity Model (Simple Humidity Model)

In diesem Modell wird die Fähigkeit der Feuchtaufnahme bzw. -abgabe des Luftknotens über einen Faktor W_{cap} berücksichtigt, der einen Wert zwischen 1 und 10 annehmen kann. Multipliziert mit der Luftmasse der thermischen Zone ($M_{air,i}$) ergibt sich die effektive Feuchtekapazität des Luftknotens. Die Feuchtebilanz bei Verwendung dieses Modells wird in Gl. 2-19 gezeigt. Es werden Feuchteänderungen durch Infiltration, durch das Lüften (mit Außenluft oder aufbereiteter Luft), über Feuchteinträge in der thermischen Zone und den Luftaustausch mit angrenzenden Zonen berücksichtigt.

$$M_{air,i} W_{cap} \frac{d\omega_i}{dt} = \dot{m}_{inf,i} (\omega_a - \omega_i) + \sum_k^{n_{vent}} \dot{m}_{v,k,i} (\omega_{v,k,i} - \omega_i) + \dot{W}_{g,i} + \sum_{i-j} \dot{m}_{cplg,s} (\omega_j - \omega_i) \quad \text{Gl. 2-19}$$

$M_{air,i}$	Luftmasse der Knotens [kg]
$\dot{m}_{inf,i}$	Luftmassenstrom über Infiltration [kg/h]
$\dot{m}_{v,k,i}$	Luftmassenstrom über Lüftung [kg/h]
$\dot{m}_{cplg,s}$	Luftmassenstrom durch Luftaustausch mit angrenzenden Zonen [kg/h]
W_{cap}	Kapazitätsfaktor [-]
$\dot{W}_{g,i}$	interne Feuchteinträge [kg/h]
ω_i	Absolute Feuchte des Luftknotens [kg _{Wasser} / kg _{Luft}]
ω_a	Absolute Feuchte der Außenluft [kg _{Wasser} / kg _{Luft}]
$\omega_{v,k,i}$	Absolute Feuchte der Zuluft über Lüftung [kg _{Wasser} / kg _{Luft}]
ω_j	Absolute Feuchte eines angrenzenden Luftknotens [kg _{Wasser} / kg _{Luft}]

b) Moisture Storage Model (Buffer Storage Model)

In diesem Modell wird die Feuchtespeicherung der Wände miterfasst, wobei diese in einen Oberflächen- und einen Tiefenspeicher unterteilt wird. Winzek (1996) erläutert, dass die Verknüpfung von Oberflächen- und Tiefenspeicher entsprechend Abbildung 2-20 passiert, wobei der Oberflächenspeicher zusätzlich noch mit dem Luftknoten gekoppelt ist. Die anzugebenden Parameter sind einerseits die Steigung der Sorptionsisothermen κ , der

2 Grundlagen

Parameter β , welcher den Feuchteaustausch zwischen den beteiligten Speichern beschreibt und die wirksamen Massen M_{surf} und M_{deep} .

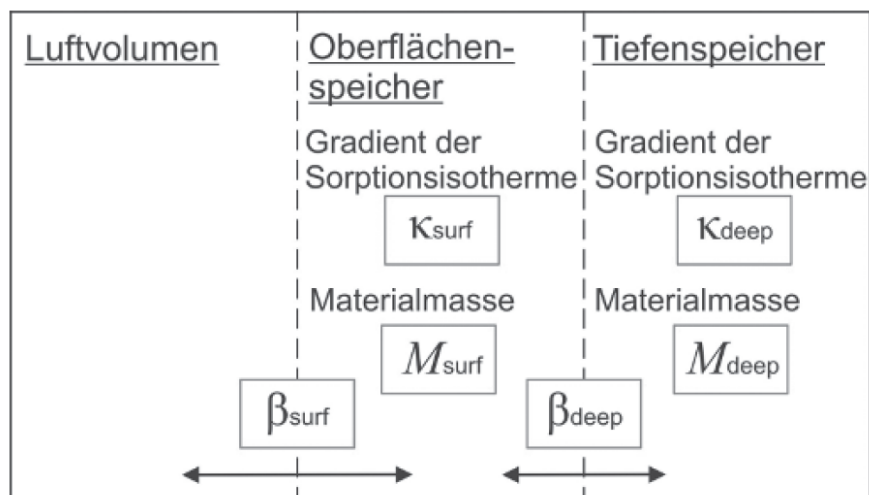


Abbildung 2-20: Schema des Buffer Storage Models nach Hiller und Schulz, 2015

Auf der linken Seite der für den Luftknoten zu lösenden Differentialgleichung entfällt der Kapazitätsfaktor (vgl. Gl. 2-20), dafür kommt auf der rechten Seite ein Term hinzu, der den Austausch mit dem Oberflächenspeicher beschreibt. Zusätzlich müssen zwei weitere Gleichungen gelöst werden, eine zur Beschreibung des Oberflächenspeichers (vgl. Gl. 2-21) und eine zweite für den Tiefenspeicher (vgl. Gl. 2-22). Das Produkt aus Speichermasse M und Steigung der Sorptionsisothermen κ beschreibt das Luftmassenäquivalent der Speicher in kg Luft. Es werden die drei Feuchtespeicher (Raum, Oberfläche, Tiefenspeicher) im Prinzip wie drei gekoppelte thermische Zonen behandelt, die untereinander Luft mit einer bestimmten absoluten Feuchte austauschen.

Eine Herausforderung ist es, den beiden Speichern die entsprechenden Baustoffe bzw. Baustoffdicken zuzuordnen, da wie Winzek (1996) zeigt, unterschiedliche Annahmen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen können. Die Berechnung der notwendigen Faktoren und alle getroffenen Annahmen werden unter Abschnitt 3.4 gezeigt. In der durchgeführten Simulationsstudie wurden jedenfalls beide Modelle verwendet und der Unterschied in den Ergebnissen ist in Abschnitt 4.4.3 dargestellt.

2 Grundlagen

$$M_{\text{air},i} \frac{d\omega_i}{dt} = \dot{m}_{\text{inf},i}(\omega_a - \omega_i) + \sum_k^n \dot{m}_{\text{v},k,i}(\omega_{\text{v},k,i} - \omega_i) + \dot{W}_{\text{g},i} + \sum_{i-j} \dot{m}_{\text{cplg},s}(\omega_j - \omega_i) + \beta_{\text{surf}}(\omega_{\text{surf}} - \omega_i) \quad \text{Gl. 2-20}$$

$$M_{\text{surf}} \kappa_{\text{surf}} f(\varphi, \omega) \frac{d\omega_{\text{surf}}}{dt} = \beta_{\text{surf}}(\omega_i - \omega_{\text{surf}}) + \beta_{\text{deep}}(\omega_{\text{deep}} - \omega_{\text{surf}}) \quad \text{Gl. 2-21}$$

$$M_{\text{deep}} \kappa_{\text{deep}} f(\varphi, \omega) \frac{d\omega_{\text{deep}}}{dt} = \beta_{\text{deep}}(\omega_{\text{surf}} - \omega_{\text{deep}}) \quad \text{Gl. 2-22}$$

β_{surf} Austauschkoeffizient Raum – Oberflächenspeicher [-]

β_{deep} Austauschkoeffizient Oberflächenspeicher – Tiefenspeicher [-]

M_{surf} „Luftmasse“ des Oberflächenspeichers [kg]

M_{deep} „Luftmasse“ des Tiefenspeichers [kg]

ω_{surf} Absolute Feuchte des Oberflächenspeichers [kg Wasser /kg Luft]

ω_{deep} Absolute Feuchte des Tiefenspeichers [kg Wasser /kg Luft]

3 SIMULATIONSTECHNISCHE MODELLIERUNG EINER FLÄCHENKÜHLUNG

Beispielhaft für den im Untersuchungsgebiet Smart City Mitte verorteten Wohnbau gilt es herauszufinden, wie detailliert, konkret und zuverlässig die Frage der Durchführbarkeit einer thermischen Bauteilaktivierung zum Heizen und Kühlen mit Hilfe von unterschiedlichen Modellen beantwortet werden kann. Das Hauptaugenmerk wird auf die Vermeidung von Kondensation und das Vorhandensein eines behaglichen Wohnklimas gelegt. Das im Baufeld Mitte der Smart City Graz installierte Konditionierungssystem besteht aus schneckenförmig verlegten Rohren, die in den Estrich eingelegt werden. Dieser ist nach oben hin mittels eines Klebers mit einem Parkettboden abgedeckt, auf der Unterseite des Estrichs befindet sich eine Dämmschicht und eine massive Betonschicht. Sollte es nun in Folge unsachgemäßer Ausführung bzw. eines unsachgemäßen Betriebs öfter zu Kondensation kommen, so würde sowohl der Estrich aber insbesondere das Parkett Schaden nehmen. Die vom Planungsbüro für die Heizung ermittelten Massenströme für alle Heiz- bzw. Kühlkreise sind konstant (starre Pumpen), wobei nur die Wohn- und Schlafzimmer mit Parkettboden ausgestattet sind. Für dieses Areal ist auch kein steuer- und regelbares mechanisches Lüftungskonzept vorgesehen, die Bewohner entscheiden somit selbst, wann und wie oft sie ihre Fenster bzw. Balkontüren öffnen und in weiterer Folge geöffnet lassen.

Zur Beantwortung der in Kapitel 1 formulierten Fragen wird eine thermische Gebäudesimulation in TRNSYS (2017) erstellt unter der Verwendung des implementierten Gebäudemoduls (vgl. Kapitel 2.4). Im Folgenden werden die verwendete Simulationssoftware sowie alle projektspezifischen Randbedingungen vorgestellt.

3.1 Verwendete Komponenten

Das Simulation Studio von TRNSYS (2017) bietet eine Vielzahl an implementierten Modellen und Komponenten. Bei den Komponenten gilt es zwischen physikalischen, Regel- und Hilfskomponenten zu unterscheiden. Alle verwendeten Komponenten sind in einer Übersicht in Abbildung 2-14 dargestellt, wobei Module bzw. Types zur Ergebnisausgabe (Ausgabefile, grafische Darstellung) der Übersichtlichkeit halber ausgeblendet sind. Eine Übersicht der unterschiedlichen Types ist in Tabelle 3-1 zu sehen. Alle zu einer funktionsfähigen Simulation verketteten Types erfüllen eine gewisse Funktion. Ein Klimadatenleser (Wheather data), in dem der verwendete Klimadatensatz (vgl. 3.3, Absatz Klima) in Form einer *.tmy2 Datei hinterlegt ist wird verwendet, die Referenzwohnung wird mit Hilfe der Komponente „building“ dargestellt. Weiters sind einige Regler enthalten, mit Hilfe derer die notwendigen

3 Simulationstechnische Modellierung einer Flächenkühlung

Temperaturgrenzen z.B. zum Ein- und Ausschalten der Kühlung, in Abhängigkeit der aktuellen Raum- und Außenlufttemperaturen in Regelsignale umgewandelt werden.





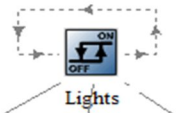



So sind folgende Regelungen implementiert:

- das Ein- und Ausschalten der Beleuchtung in Abhängigkeit der einfallenden Strahlung
- das Hoch- und Runterfahren einer Verschattungseinrichtung (Wirkungsgrad 70%), ebenfalls in Abhängigkeit der einfallenden Strahlung und der Raumtemperatur
- Ein- und Ausschalten einer Nachtlüftung, wobei dies in den gegenständlich ausgewerteten Simulationen nicht verwendet wurde
- Feststellen ob Heiz, oder Kühlperiode in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur (Mittelwert der letzten 24 Stunden, größer 20 °C → Kühlfall; kleiner 12 °C → Heizfall)
- Wahl der Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der Raumlufttemperatur (Mittelwert der letzten 4 Stunden; wenn 4-Std.-Mittelwert der Raumlufttemperatur größer 21 °C +/- 1K → 40 °C Vorlauftemperatur; wenn 4-Std.-Mittelwert der Raumlufttemperatur größer 26 °C +/- 1K → 14-18 °C oder taupunktgeführte Vorlauftemperatur)

Die beiden letztgenannten Regelungen werden in der Komponente „TABS“ (vgl. Abbildung 2-14) zusammengeführt. Diese gibt dann den Massenstrom und die Vorlauftemperatur als Inputgröße an das Gebäudemodell weiter. Für den Kühlfall bedeutet dies konkret, dass bei Erreichen einer Raumlufttemperatur von 27 °C die Kühlung solange aktiviert wird, bis die Temperatur auf 25 °C abgesenkt wurde.

3 Simulationstechnische Modellierung einer Flächenkühlung

Tabelle 3-1: Verwendete Komponenten und deren Funktion

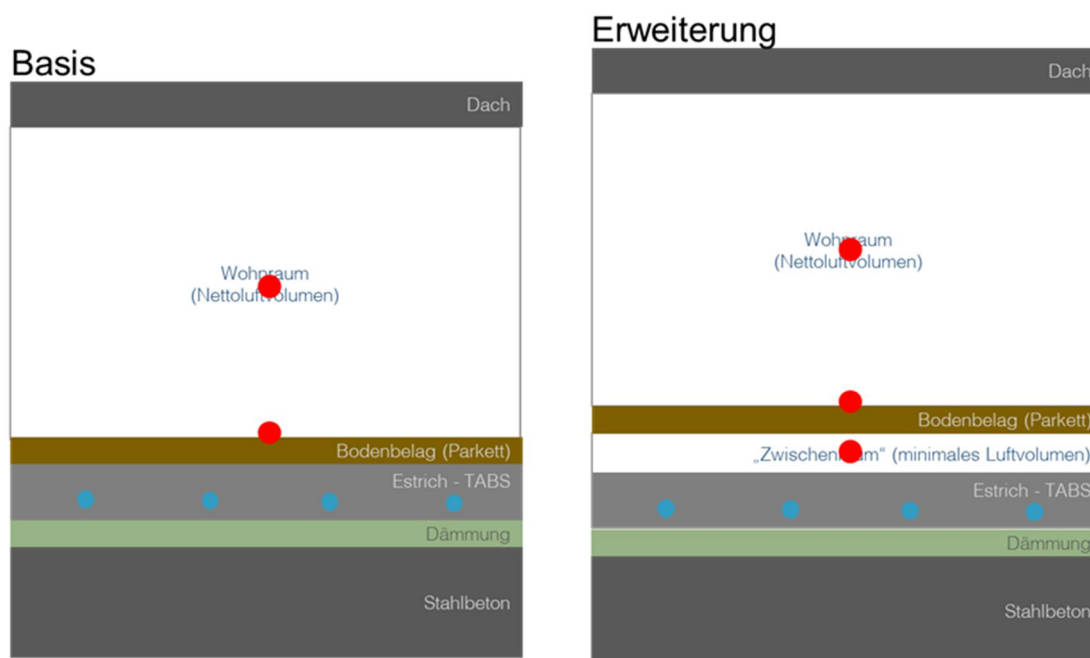
Art der Komponente	Komponente	Symbol	Beschreibung
Physikalische Komponenten	Wheater data		Beinhaltet ein Inputfile mit Klimadaten (z.B. aus Meteonorm) und rechnet intern die wichtigsten Größen (z.B. Einstrahlung auf unterschiedlich geneigte Flächen).
	T_Boundary		Unter Angabe von physikalischen Parametern für das umliegende Erdreich kann für mehrere Punkte die Erdreichstemperatur berechnet werden (z.B. für Keller als Randbedingung)
	Building		Gebäudemodell, detailliert beschrieben in Kap. 3.2.1
Regelkomponenten	Regler mit gleichverteiltem Regelband		Regler schaltet Ein/ Aus aufgrund einer Inputgröße (z.B. Raumtemperatur) $\pm \Delta/2$
	Regler mit wählbarem Regelband		Regler schaltet Ein/ Aus aufgrund einer Inputgröße (z.B. Raumtemperatur) $+\Delta_{\text{oben}} / +\Delta_{\text{unten}}$
Hilfskomponenten	Equations		Hier können einfache mathematische Berechnungen durchgeführt (z.B. Umrechnungen) oder Inputwerte für andere Types leicht geändert werden
	Mittelwert bilden		Bildet über einen beliebigen Zeitraum den Mittelwert einer Größe, um z.B. gewissen Schwankungen aus Regelgrößen etwas zu glätten
	Datenleser		Hier können Datenfiles eingelesen werden (z.B. die internen Lasten werden zuvor als *.txt Datei vorbereitet)

3.2 Implementierung der Flächenkühlung in TRNSYS

Im ersten Schritt wurde für die Simulation ein thermisches Modell (Basismodell) erstellt, bei dem der Boden als ein zusammenhängender „Wandaufbau“ der thermischen Zone als Begrenzungsfläche zugewiesen wird. Wie in Abbildung 3-1 links gezeigt erhält man auf diese Weise die Temperatur an der Bodenoberfläche (am Parkett) und die Temperatur an der Unterseite des Betons als Simulationsergebnis. Man erhält keine Kenntnis über die Temperaturverteilung zwischen Parkett und Estrich oder anderen Schichten und eine Untersuchung auf Kondensationsfreiheit ist somit nicht möglich. Aus diesem Grund wurde das thermische Modell um eine Zone erweitert, der lediglich ein kleinstmögliches Luftvolumen

3 Simulationstechnische Modellierung einer Flächenkühlung

zugerechnet wird. Durch diese Erweiterung generiert man eine weitere Temperatur, nämlich die Temperatur unter der Klebeschicht, also zwischen Parkett und Estrich (vgl. Abbildung 3-1, rechts). Dieser Bereich ist für ein Auftreten von Kondensation besonders kritisch. Das Einführen einer weiteren Zone unterhalb des Estrichs ist aus modellspezifischen Gründen nicht möglich. Dazu wäre eine Erhöhung der Überdeckung (= Dicke des Estrichs über der Rohrebene) notwendig, um die unter 2.4.1 geforderten Grenzen für die Verwendung des „active layers“ einzuhalten. Die Überdeckung hat aber Einfluss auf die im Raum wirksame Kühlleistung. Würde man die Überdeckung erhöhen, wäre jene Kühlleistung nicht mehr ident mit jener aus dem Basismodell und somit wären auch alle anderen Ergebnisse verfälscht. Außerdem entspräche eine höhere Überdeckung nicht mehr den Planungsvorgaben. Aus diesen Gründen werden für die Berechnungen das Basismodell (Abbildung 3-1, links) und das einfach erweiterte Modell (Abbildung 3-1, rechts) verwendet.



● Temperatur, Feuchte

Abbildung 3-1: Fußbodenmodellierung mit Basismodell (links) und erweitertem Modell (rechts)

Das verwendete Gebäudemodell Type 56 ist ein Luftknotenmodell, d.h. es wird die Temperatur und relative Luftfeuchte eines Luftknotens und die Oberflächentemperaturen der angrenzenden Wände berechnet. Die Fußbodenoberflächentemperatur der beiden Modelle wurde verglichen und der Unterschied als akzeptabel eingestuft. Da ja im Wesentlichen ein Worst Case Szenario dargestellt wird, geht man davon aus, dass die im Raum anfallende Feuchte ohne Zeitverzug auch am Estrich wirksam wird, was über eine Koppelung der beiden Luftknoten „Wohnraum“ und „Zwischenraum“ geschieht. Das minimal mögliche Luftvolumen des Zwischenraums ($0,00001 \text{ m}^3$) wird je Stunde einmal komplett mit Luft aus dem Wohnraum

3 Simulationstechnische Modellierung einer Flächenkühlung

ausgetauscht. Im untersuchten Gebäude wird ein Nassbausystem der Firma Uponor verwendet, bei dem Heiz-/Kühlebene und Dämmschicht voneinander getrennt sind. Die im Durchmesser 17 mm dünnen Rohre aus einem speziellen Kunststoff haben eine Wandstärke von 2 mm und sind in einem Abstand von 20 cm verlegt. Sie befinden sich 6,5 cm unter der Estrichoberfläche. Dieser ist durch einen Kleber mit dem Holzparkett verbunden. An der Estrichunterseite ist eine Trittschalldämmung angebracht, die Estrich und Beton voneinander trennt (vgl. Abbildung 3-2).

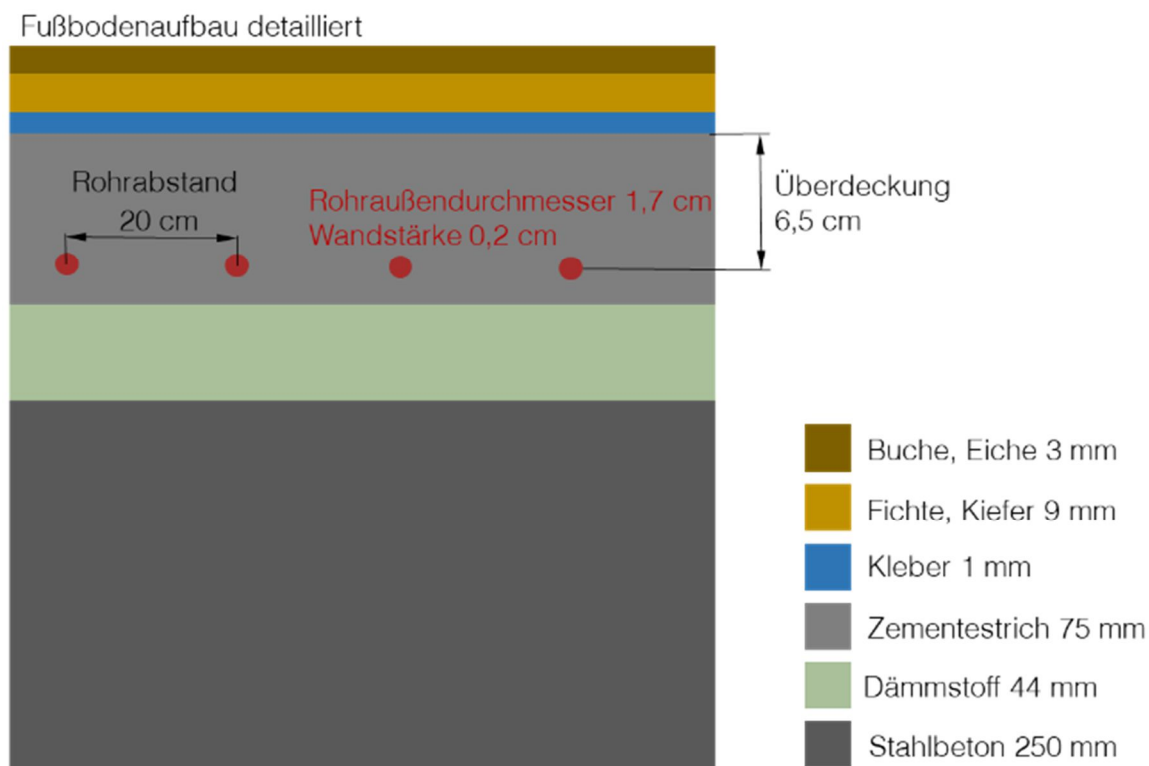


Abbildung 3-2: Fußbodenaufbau inkl. Fußbodenkühlung

Die Rohre Heiz- bzw. Kühlkreis des Wohnraums werden von kaltem Wasser (14 bis 18 °C) in der Menge von 188 kg/h durchströmt. Dies entspricht dem Massenstrom der Heizungsauslegung und soll für den Sommerbetrieb nicht verändert werden. Dies bedeutet allerdings, dass eine Regelung des Massenstroms nicht möglich ist.

3.3 Referenzwohnung in Smart City Mitte

Da das Hauptaugenmerk der hier durchgeführten Untersuchungen auf der Durchführbarkeit einer Gebäudekühlung liegt wurde bei der Auswahl der Referenzwohnung darauf geachtet, dass das Referenzobjekt dem Zweck entsprechend eher ungünstig gelegen ist. Es handelt sich bei der Auswahl um eine Wohnung im siebten und damit letzten Obergeschoß, die keine Möglichkeit zur Querlüftung aufweist und mit großen Fensterflächen ausgestattet ist.

3 Simulationstechnische Modellierung einer Flächenkühlung

3.3.1 Klima

Zur korrekten Abbildung des vorherrschenden Klimas wurde ein Klimadatensatz der Stadt Graz verwendet, der mittels Meteonorm (2012) erstellt wurde und auf Messwerten der Jahre 2000 bis 2010 basiert. Die monatlich gestaffelten Kenndaten sind in Tabelle 3-2 dargestellt.

Tabelle 3-2: Kennwerte des verwendeten Klimadatensatzes der Stadt Graz (2000-2010)

Klimadaten Graz 2000-2010			Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Globalstrahlung	max	[W/m ²]	411	551	709	898	916	1027	1011	912	804	699	492	359	1027
	Mittelwert	[W/m ²]	49	89	127	174	219	232	232	197	149	93	52	37	138
	Energie	[kWh/m ²]	36	60	95	125	163	167	172	147	108	69	37	27	1206
Diffusstrahlung	Maxima	[W/m ²]	188	293	364	410	451	462	454	426	385	288	213	168	462
	Mittelwert	[W/m ²]	24	40	60	98	106	130	106	105	71	52	28	23	70
	Energie	[kWh/m ²]	18	27	45	71	79	94	79	78	51	38	21	17	617
Lufttemperatur	Minima	[°C]	-12.3	-8.7	-7.2	0.1	4.7	8.0	9.2	9.9	6.1	0.0	-4.7	-9.3	-12.3
	Maxima		12.4	14.1	19.2	24.6	28.5	32.6	32.7	31.9	27.2	24.0	17.0	10.9	32.7
	Mittelwert		-1.2	1.8	6.1	11.2	16.6	19.4	21.1	20.5	15.2	11.0	5.3	0.0	10.6
Luftfeuchte	Minima	[%]	43	29	18	26	28	31	27	29	33	36	37	55	18
	Maxima		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	Mittelwert		83	74	68	67	66	67	66	71	76	80	83	88	74

In den folgenden Abbildungen sind der Jahresverlauf der Größen Außenlufttemperatur, -feuchte (vgl. Abbildung 3-3), Global- und Diffusstrahlung (vgl. Abbildung 3-4) dargestellt. Es ist erkennbar, dass im Sommer die Außenlufttemperaturen (blaue Linie) über 30 °C steigen und eine nächtliche Abkühlung auf etwa 20 °C stattfindet. Die relative Außenluftfeuchte (gepunktete Linie) ist ganzjährig auf einem hohen Niveau, wobei es im Sommer auch trockenere Phasen gibt, in denen nur 30% Außenluftfeuchte vorliegen. Die Globalstrahlung, in Abbildung 3-4 in gelb, hat ihr Maximum mit 1027 W/m² Anfang Juni. Die Werte des Klimadatensatzes stellen Stundenmittelwerte dar.

3 Simulationstechnische Modellierung einer Flächenkühlung

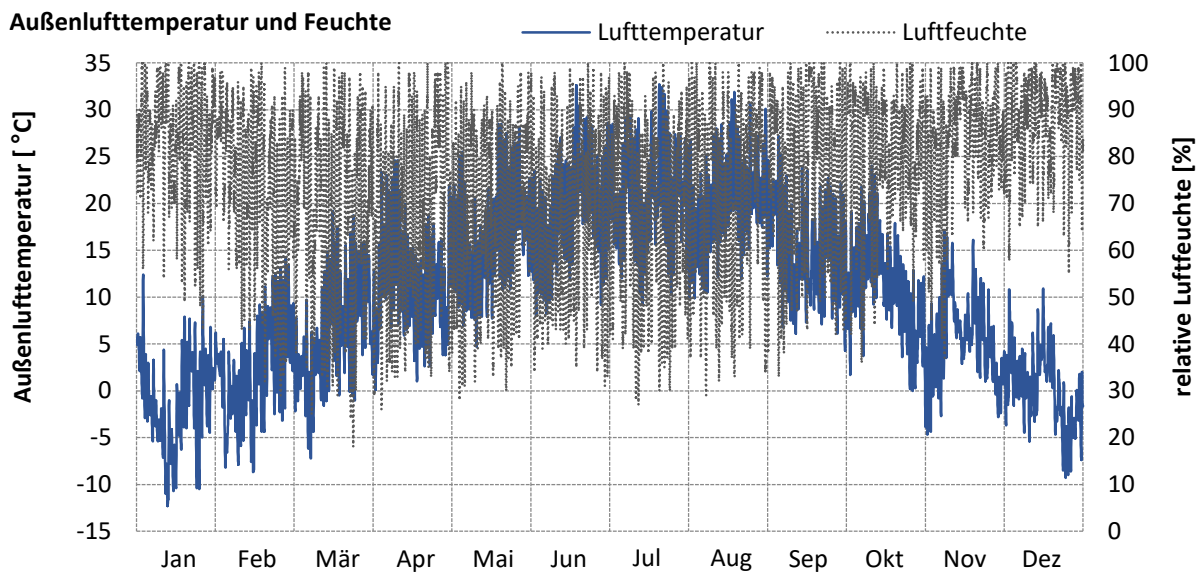


Abbildung 3-3: Außenlufttemperatur und relative Luftfeuchte des verwendeten Meteonorm (2012) Klimadatensatzes für Graz (2000-2010)

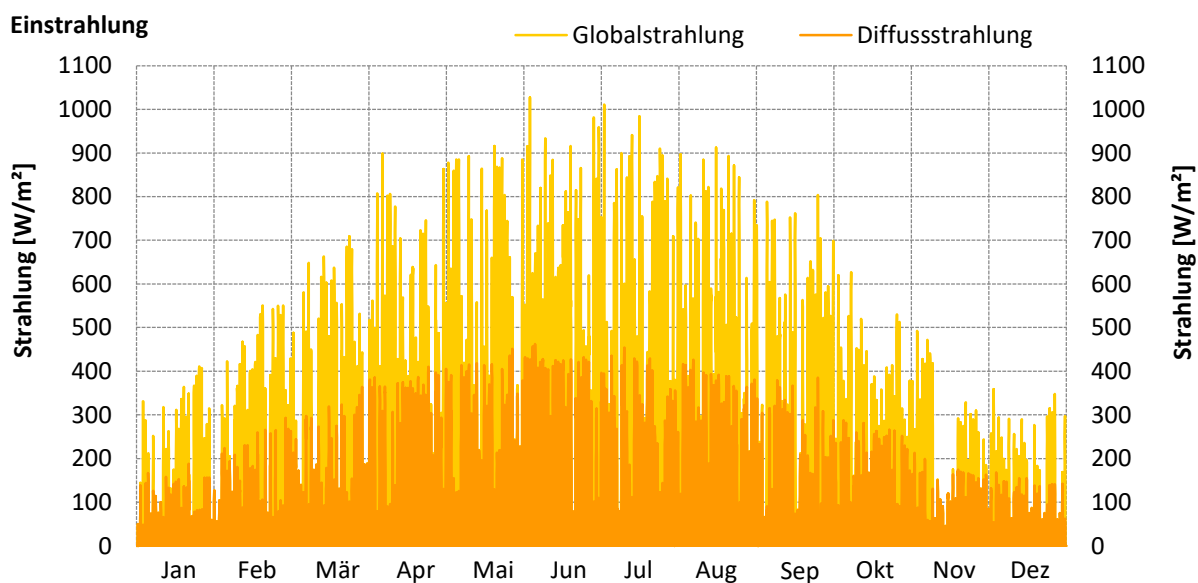


Abbildung 3-4: Globalstrahlung und Diffusstrahlung des verwendeten Meteonorm (2012) Klimadatensatzes für Graz (2000-2010)

3.3.2 Zonierung, Wandaufbau

Das für die durchgeführten Arbeiten verwendete Gebäudemodell enthält die im Grundriss (vgl. Abbildung 3-5) orange markierte Wohnung der Bezeichnung N66. Sie besteht aus einem Wohnraum mit integrierter, offener Küche, einem Schlafzimmer, sowie Vorraum und Badezimmer. Die Wohnung ist durch einen angrenzenden Gang betretbar, seitlich sind weitere Wohnungen angesiedelt und an der Vorderseite gibt es zwei große Fensterflächen mit süd-süd-östlicher Ausrichtung.

3 Simulationstechnische Modellierung einer Flächenkühlung

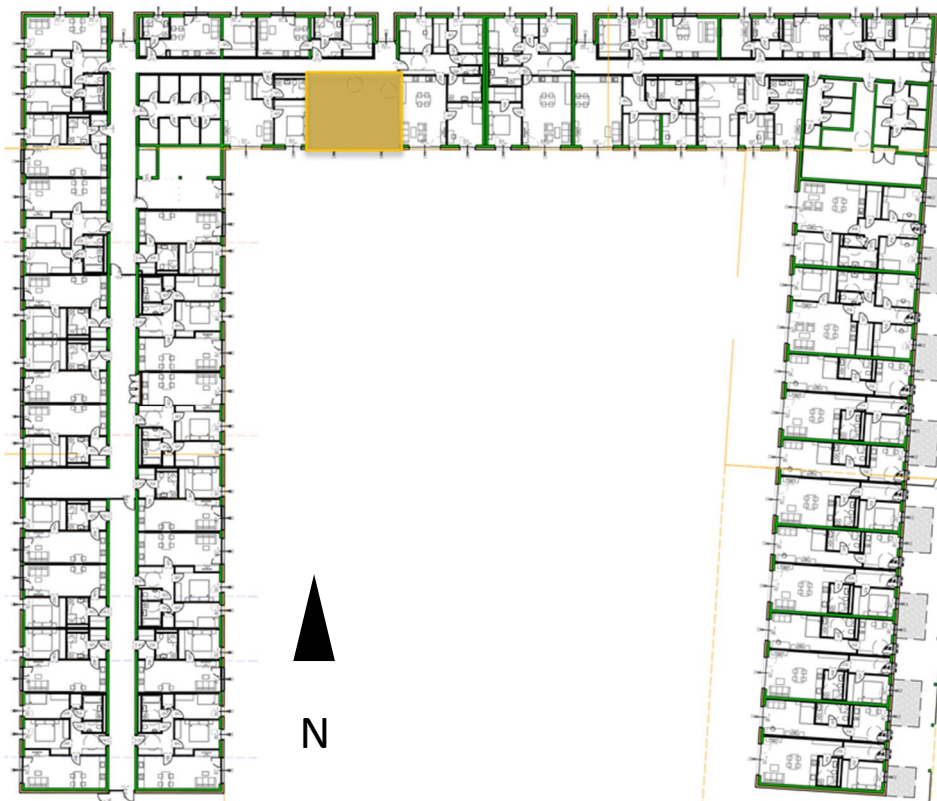


Abbildung 3-5: Grundriss Baufeld Mitte 7. OG

Der offen gestaltete Wohnraum und das Schlafzimmer wurden zu einer thermischen Zone zusammengefasst, Badezimmer und Vorraum sind in getrennten Zonen abgebildet (vgl. Abbildung 3-6). In dieser Abbildung links dargestellt ist das Bruttomodell, bei dem die Außenmaße verwendet werden, d.h. die Dicke der Wände ist im Modell enthalten. Beim Nettomodell (rechts) werden nur die tatsächlich vorhandenen Flächen verwendet, also so wie man den Raum als Bewohner sieht.

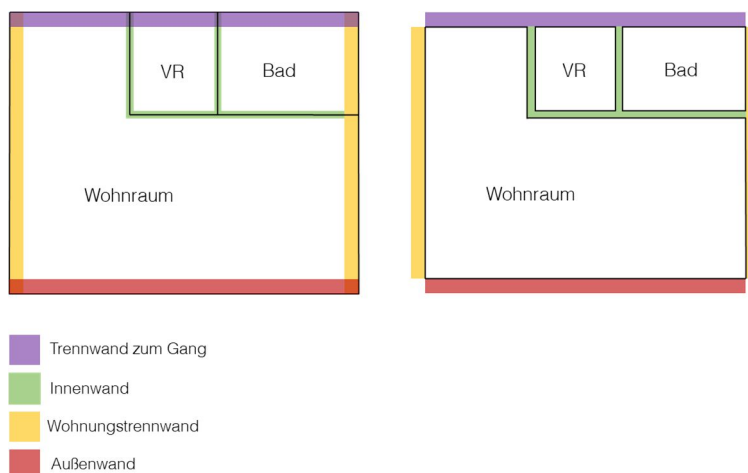


Abbildung 3-6: Bruttozonierung (links) und Nettozonierung (rechts) der Referenzwohnung

Das Gebäudemodell wurde mit Bruttomaßen erstellt, die Luftvolumina der einzelnen thermischen Zonen mit Nettomaßen berechnet, wobei die genauen Werte Tabelle 3-3

3 Simulationstechnische Modellierung einer Flächenkühlung

entnommen werden können. Es ist gängige Praxis für die Modellierung auf Bruttomaße zurückzugreifen um dann die im Modell errechneten Luftvolumina mit den Nettowerten zu korrigieren, so werden die Wandschnittlinien in den Ecken als Wärmebrücken berücksichtigt, aber das Luftvolumen korrekt berechnet. Die Volumina berechnen sich mit einer lichten Raumhöhe von 2,57 m.

Tabelle 3-3: Eckdaten thermisches Modell

	Bruttofläche [m ²]	Nettofläche [m ²]	Nettoluftvolumen [m ³]
Wohnraum, Zimmer	48.2	40.5	104.1
Vorraum	5.0	4.6	11.8
Badezimmer	8.2	5.8	14.9

Die unterschiedlichen Wandaufbauten sind im thermischen Modell nachgebildet und farblich in Abbildung 3-6 gekennzeichnet. An der Vorderseite befindet sich die Außenwand (rot), die außerdem zwei große Fensterflächen (3-fach Verglasung) enthält (vgl. Tabelle 3-4). Der U-Wert eines Fensters (U_w) setzt sich zusammen aus dem U-Wert der Verglasung (U_G) und des Rahmens (U_F). Die Abgrenzung zu den benachbarten Wohnungen (gelb) ist konstruktiv anders aufgebaut als die Trennwand zum Gang (lila). Die wohnungsinternen Wände (grün) bestehen wie üblich aus Gipskartonplatten mit einer im Zwischenraum liegenden Dämmschicht. Eine Übersicht über die einzelnen Schichten der vorhandenen Wände ist in Tabelle 3-5 zu finden, wobei hier auch die wichtigsten physikalischen Kennwerte wie Wärmeleitfähigkeit und Dichte angeführt sind. Nach oben hin wird die Wohnung durch eine Dachfläche abgeschlossen, an der Unterseite befindet sich der Boden, der auch die wasserführenden Rohre für die Flächenkonditionierung enthält.

Tabelle 3-4: Detaillierte Beschreibung der Fenster

	Breite [m]	Höhe [m]	Fläche [m ²]	U_w [W/m ² K]	U_G [W/m ² K]	g-Wert [-]	Anteil Rahmen [-]	U_F [W/m ² K]
Fenster A	3.08	2.55	7.85	0.8	0.7	0.501	0.14	1.4
Fenster B	1.58	2.55	4.03	0.8	0.7	0.501	0.21	1.2

3 Simulationstechnische Modellierung einer Flächenkühlung

Tabelle 3-5: U-Werte der Wände

	Material	Dichte [kg/m ³]	Dicke [m]	λ [W/(mK)]	U-Wert [W/(m ² K)]
Außenwand	Dämmstoff	100	0.195	0.039	0.190
	Stahlbeton	2200	0.250	2.100	
Dach	Dämmstoff	100	0.27	0.039	0.138
	Stahlbeton	2200	0.250	2.100	
Innenwand	GKF Platte	900	0.0125	0.239	0.448
	Dämmstoff	100	0.075	0.039	
	GKF Platte	900	0.0125	0.239	
Wohnungs- trennwand	Dämmstoff	100	0.069	0.039	0.478
	Stahlbeton	2200	0.250	2.100	
Trennwand zum Gang	GKF Platte	900	0.025	0.239	0.221
	Dämmstoff	100	0.079	0.039	
	GKF Platte	900	0.0125	0.239	
	Dämmstoff	100	0.079	0.039	
	GKF Platte	900	0.025	0.239	
Fußboden	Buche, Eiche	800	0.003	0.200	0.627
	Fichte, Kiefer	600	0.009	0.131	
	Kleber	1700	0.001	0.155	
	Estrich	2000	0.075	1.400	
	Dämmstoff	100	0.044	0.039	
	Stahlbeton	2200	0.25	2.1	

3.3.3 Interne Wärme- und Feuchtelasten

Hier sind einerseits die in die Wohnung eingebrachten Wärmeeinträge durch Personen, elektrische Geräte und Beleuchtung zu erwähnen, andererseits wird aber auch großes Augenmerk auf die eingebrachten Feuchtelasten gelegt. Die Datengrundlage bietet das Schweizer Merkblatt SIA 2024 (2015), in dem für unterschiedliche Raumnutzungen Lastprofile angeführt sind. Das verwendete Lastprofil für Wohnen in Mehrfamilienhäusern wurde den folgenden Annahmen zugrunde gelegt, es wurde hinsichtlich der Anwesenheit der Personen projektspezifisch adaptiert. Ausgegangen wird von einer Belegung mit 3 Personen (2 Erwachsene, 1 Kleinkind), wobei ein Erwachsener berufstätig ist und der Zweite mit dem Kleinkind auch untertags in der Wohnung bleibt. Tägliche Abwesenheiten für Erledigungen, Spaziergänge o.ä. werden im Anwesenheitsverlauf integriert. Hinsichtlich der Beleuchtung wurden realistische Annahmen getroffen, wobei in der Simulation eine zusätzliche einstrahlungsabhängige Regelung ausgeführt ist, die bei ausreichender Helligkeit die Beleuchtung ausschaltet. Zur Anwesenheit ist zu sagen, dass die arbeitende Person bis 6 Uhr

3 Simulationstechnische Modellierung einer Flächenkühlung

schläft, um 7 die Wohnung verlässt und um 18 Uhr wieder nach Hause kommt und um 22 Uhr ins Bett geht. Der Elternteil, der mit dem Kleinkind zu Hause bleibt, schläft eine Stunde länger bis 7 Uhr, ist am Vormittag (10:00-11:00) und am Nachmittag (15:00-16:00) nicht in der Wohnung anwesend und geht ebenfalls um 22 Uhr ins Bett.

Durch die Multiplikation mit den entsprechenden Wärmeleistungen ergibt sich ein typischer Tagesverlauf der internen Lasten für dieses Referenzobjekt (vgl. Abbildung 3-7). Bei Vollbelegung bringen die Personen 2,7 W/m² (schwarze Balken) in die thermische Zone ein. Betrachtet man die Wärmeeinträge durch Geräte (grauer Balken) sind vier Peaks erkennbar, die darauf zurückzuführen sind, dass in diesen Stunden z.B. gekocht wird.

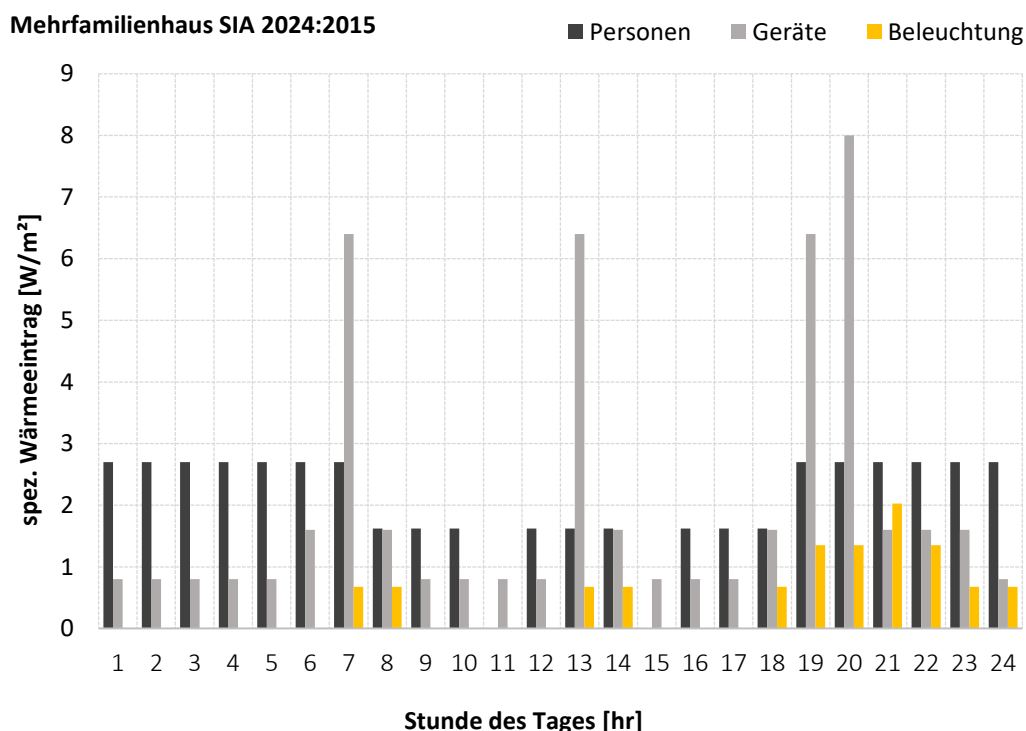


Abbildung 3-7: Tagesverlauf der spezifischen Wärmeeinträge durch Personen, Geräte und Beleuchtung

Wenn man die Stundenwerte aufsummiert ergeben sich für das untersuchte Objekt die in Tabelle 3-6 gezeigten spezifischen Jahreswerte in kWh/(m²a).

Tabelle 3-6: Spezifische Jahressummen der eingebrachten Wärmen nach SIA 2024-2015

Personen		Geräte		Beleuchtung	
radiativ [kWh/(m ² a)]	konvektiv [kWh/(m ² a)]	radiativ [kWh/(m ² a)]	konvektiv [kWh/(m ² a)]	radiativ [kWh/(m ² a)]	konvektiv [kWh/(m ² a)]
7.4	7.4	2.9	11.6	1.3	1.9
14.8		14.5		3.2	

Hinsichtlich der anfallenden Feuchtelasten ist festzuhalten, dass die in SIA 2024 (2015) enthaltenen Werte sehr gering erscheinen. Da die in der vorliegenden Arbeit geforderte

3 Simulationstechnische Modellierung einer Flächenkühlung

Kondensationsfreiheit der Bodenkonstruktion auch von den eingebrachten Feuchtelasten abhängt (je höher die im Raum vorhandene Feuchte umso eher kommt es unter kritischen Temperaturbedingungen zu Kondensation) wurde auf andere Erfahrungswerte zurückgegriffen und die einzelnen Feuchteproduzenten werden getrennt voneinander angenommen. Alle feuchterelevanten Vorgänge bzw. Feuchteproduzenten sind angelehnt an die von Zürcher und Frank (2018) angeführten Werte und in Tabelle 3-7 dargestellt. Die spezifischen Werte (rechte Spalte) wurde aus dem absoluten Wert und Berücksichtigung der Nettowohnungsfläche ermittelt.

Tabelle 3-7: Feuchtelasten gestaffelt nach Tätigkeit/Produzent

Feuchtequelle	Wert absolut		Wert spezifisch	
Person, schlafend	45	g/h	0.7	[g/h m ²]
Person, Hausarbeit	90	g/h	1.4	[g/h m ²]
Pflanze	2	g/h	0.0	[g/h m ²]
Duschen	1700	g je Bad	26.3	[g/h m ²]
Wäsche waschen	275	g je Waschgang	4.2	[g/h m ²]
Wäsche trocknen	125	g/h	1.9	[g/h m ²]
Kochen	575	g/h	8.9	[g/h m ²]
Geschirr waschen	200	g je Spülgang	3.1	[g/h m ²]

In der Wohnung gibt es vier Pflanzen die je 2 g Wasser pro Stunde in die Wohnung einbringen. Die Feuchteproduktion einer schlafenden Person unterscheidet sich von einer Person die Hausarbeit erledigt, auch dieser Umstand ist in den verwendeten Feuchtelasten berücksichtigt. Die arbeitende Person geht in der Früh, der andere Elternteil abends duschen (je 1700 g). Was die Hausarbeit betrifft, so fallen als Feuchtelasten das Waschen von Wäsche (am Vormittag), das Aufhängen der gewaschenen Wäsche zur Trocknung, das zweimalige Kochen (mittags und abends) und das Betreiben des Geschirrspülers (zweimal täglich) an. Auf einen Tag aufsummiert (vgl. Tabelle 3-8) ergibt dies einen Wert von 8 kg (vgl. Tabelle 3-8, angelehnt an SIA 2024) an eingebrachter Feuchte, wohingegen nach SIA 2024 (2015) nur 3,8 kg anfallen würden. Auch liegt man mit dem verwendeten Wert näher an den von Rieberer (2016) erwähnten 11 kg pro Tag für einen 4 Personenhaushalt.

Tabelle 3-8: Verwendete Feuchtelasten als Jahressumme

Feuchteinträge	spezifisch, pro Jahr [kg/m ² a]	absolut, pro Jahr [kg/a]	absolut, pro Tag [kg/Tag]
gemäß SIA 2024	21.4	1 385	3.8
angelehnt an SIA 2024	45.3	2 931	8.0

Wie auch bei den eingebrachten Wärmemengen wird der je Stunde anfallende Wert der Feuchtelast mit der Personenanwesenheit multipliziert, wodurch sich der in Abbildung 3-8

3 Simulationstechnische Modellierung einer Flächenkühlung

gezeigte Tagesverlauf ergibt, wobei auch der Vergleich zu den aus dem Schweizer Merkblatt entnommenen wesentlich niedrigeren Werten veranschaulicht wird.

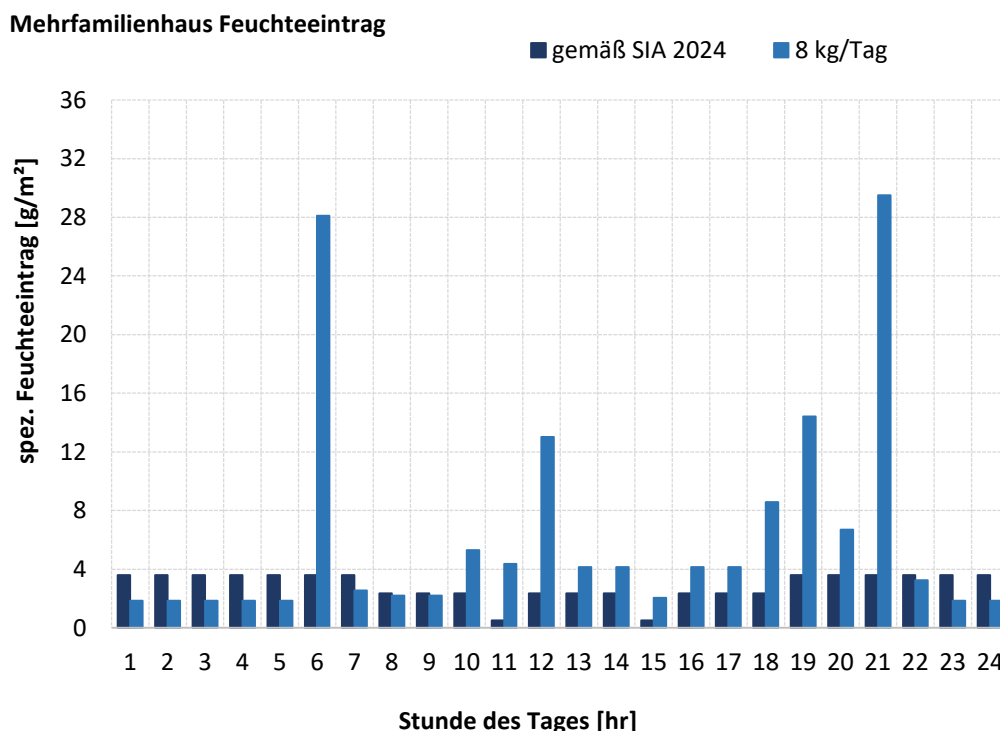


Abbildung 3-8: Tagesverlauf der eingebrachten Feuchtelasten

3.3.4 Werte zur Berechnung des PMV-, PPD-Index

Um eine solche Berechnung durchführen zu können, ist die Erstellung eines sogenannten „Comfort Types“ notwendig. Diesem Type werden Werte für Bekleidung (clothing factor) und Tätigkeit (metabolic rate) zugewiesen, positioniert ist der „Comfort Type“ standardmäßig in Raummitte. In diesem Fall geht man von einem Bekleidungsfaktor von 0,56 (leichte Sommerkleidung, vgl. Tabelle 2-2) und einer Metabolic Rate von 1,2 (sitzende Tätigkeit, vgl. Tabelle 2-3) aus.

3.3.5 Lüftung, Infiltration, Verschattung

Da es im vorliegenden Projekt keine gesteuerte Be- und Entlüftung gibt, wird angenommen, dass der Luftwechsel bei $0,55 \text{ h}^{-1}$ liegt und die Infiltration ist mit $0,1 \text{ h}^{-1}$, also insgesamt $0,65 \text{ h}^{-1}$ berücksichtigt. Die Verschattung wird einstrahlungs- und raumtemperaturabhängig geregelt.

3.4 Koeffizientenberechnung für das detaillierte Feuchtemodell

Wie in Kapitel 2.4.2 zum „moisture storage model“ beschrieben, ist es notwendig die Parameter dieses Modells zu bestimmen, was im Folgenden gezeigt wird.

3 Simulationstechnische Modellierung einer Flächenkühlung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden nur Wände berücksichtigt, denen im Vergleich zu den anderen Baustoffen eine gewisse Feuchtaufnahmefähigkeit zugeordnet werden kann, Umschließungsflächen aus Beton sind also nicht Teil dieser Modellierung. Alle anderen Hüllflächen wurden so aufgeteilt, dass die Hälfte der Dicke der obersten Schicht den Oberflächenspeicher repräsentiert und die zweite Hälfte plus ein Teil der zweiten Schicht wird als Tiefenspeicher verwendet. Dementsprechend wurden die Massen bestimmt, also als Produkt aus Fläche, entsprechender „Speicherdicke“ und der jeweiligen Dichte. Die Berechnung der Austauschkoefizienten β_{surf} und β_{deep} zur Verwendung in Gl. 2-20, 2-21 und 2-22 wird im Folgenden gezeigt.

$$\beta_{\text{surf}} = 0,1 \frac{A}{0,094 \frac{1}{\beta'} + \sum d_i \mu_i} \quad \text{Gl. 3-1}$$

$$\beta_{\text{deep}} = 0,1 \frac{A}{\sum d_i \mu_i} \quad \text{Gl. 3-2}$$

- A Fläche [m²]
- β' Wasserdampfübergangskoeffizient [m/h]
- d_i Schichtdicke [m]
- μ_i Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-]

Für das detaillierte Feuchtemodell werden die Innenwände, die Trennwand zum Gang, die Wohnungstrennwand und der Fußboden berücksichtigt. Für diese Wände wurden die jeweiligen Parameter ermittelt, die im Modell verwendeten Werte entsprechen einer flächengewichteten Mittelung der ermittelten Parameter. Unter Verwendung der entsprechenden physikalischen Größen (vgl. Tabelle 3-9) wurden die in Tabelle 3-10 gezeigten Parameter ermittelt. Der Wert für den Wasserdampfübergangskoeffizienten β' in Gl. 3-1 wird nach Willems et al. (2006) mit 10 m/h angenommen, die anderen Größen sind angelehnt an das von Winzek (1996) gezeigte Beispiel bzw. sind der TRNSYS (2017) Datenbank entnommen.

3 Simulationstechnische Modellierung einer Flächenkühlung

Tabelle 3-9: Baustoffspezifische Werte zur Koeffizientenberechnung

	Wasserdampf- diffusions- widerstandszahl	Dichte	Steigung der Sorptions- isothermen
	μ [-]	ρ [kg/m ³]	κ [-]
Beton	100	2200	0.04
Dämmung	5	100	0.5
GFK	8	900	0.015
Holz	40	650	0.2
Estrich	100	2000	0.04
Putz	20	1800	0.015

Tabelle 3-10: Ermittelte Parameter fürs detaillierte Feuchtemodell für den Wohnraum gemäß Gl. 2-20 - Gl. 2-22

Luftmassenäquivalent Oberflächenspeicher M_{surf}	181	[kg]
Luftmassenäquivalent Tiefenspeicher M_{deep}	196	[kg]
Austauschkoeffizient Raum- Oberflächenspeicher β_{surf}	32	[-]
Austauschkoeffizient Oberflächen- Tiefenspeicher β_{deep}	4	[-]

4 ANALYSE DER SIMULATIONSERGEBNISSE

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse und Erkenntnisse der durchgeführten Simulationsstudie erläutert. Es wird die Auswertung einer Variante im Detail gezeigt, um einen Einblick über alle ausgewerteten Größen zu erhalten und ausgehend von dieser werden Vergleiche mit anderen gezogen. Die grafischen Auswertungen aller berechneten Szenarien können dem Anhang entnommen werden.

4.1 Simulationsvarianten

Es wurden insgesamt wie in Tabelle 4-2 angeführt 13 Varianten gerechnet. Die Bezeichnung der Varianten soll Aufschluss über die verwendeten Modelle geben und außerdem wird die eingebundene Feuchtelast angeführt und ein Verweis hinsichtlich der Konditionierungsparameter ist gegeben.

Die erste Stelle (B, E) gibt Aufschluss über das verwendete Gebäudemodell, also Basismodell (B) oder erweitertes Modell (E) (vgl. Abbildung 3-1), an zweiter Stelle wird das verwendete Feuchtemodell angeführt, die unter Abschnitt 2.4.2 erläutert wurden. Die Zahl an der vorletzten Stelle gibt Hinweis auf die eingebrachten Feuchtelasten, also ob es 3,8 kg/Tag (nach SIA 2024) oder doch 8 kg/Tag sind. Die letzte Stelle steht für die Konditionierung, keine aktiv stattfindende Kühlung wird mit „kK“ bezeichnet, die vorkommenden Zahlenwerte stehen für die verwendete Vorlauftemperatur bzw. ist mit „opt“ eine Variante gemeint, in der die Vorlauftemperatur taupunktgeführt ist (vgl. Tabelle 4-1). Bei letztgenannter Variante ist die Vorlauftemperatur 2K über dem aktuell vorherrschenden Taupunkt der Raumluft, ermittelt aus Raumlufttemperatur und -feuchte.

Tabelle 4-1: Erläuterungen zur Variantenbezeichnung

Bezeichnung	Erklärung	Varianten
B, E	verwendetes Gebäudemodell	B...Basismodell E...erweitertes Modell
S, B	verwendetes Feuchtemodell	S...Simple Humidity Model B...Buffer Storage Model
3, 8	Feuchtelasten	3,8 kg/Tag 8 kg/Tag
kK, 14, 15, 16, 17, 18, opt	Parameter Fußbodenkühlung	kK...keine Kühlung 14, 15, 16, 17, 18, opt... gewählte Vorlauftemperatur

4 Analyse der Simulationsergebnisse

Tabelle 4-2: Simulationsmatrix

Variante	Gebäudemodell	Feuchtemodell	Feuchtelasten	Raumkonditionierung
		Basisgebäudemodell	Simple Humidity Model	3.8 kg/Tag
				$T_{VL} = 14-18\text{ °C}$
	Erweitertes Gebäudemodell	Buffer Storage Model	8 kg/Tag	$T_{VL} = \text{taupunktsgeführt}$
B-S-3-kk	Basisgebäudemodell	Simple Humidity Model	3.8 kg/Tag	ideal geheizt, keine Kühlung
B-S-3-18	Basisgebäudemodell	Simple Humidity Model	3.8 kg/Tag	$T_{VL} = 18\text{ °C}$
B-S-8-18	Basisgebäudemodell	Simple Humidity Model	8 kg/Tag	$T_{VL} = 18\text{ °C}$
B-B-3-18	Basisgebäudemodell	Buffer Storage Model	3.8 kg/Tag	$T_{VL} = 18\text{ °C}$
B-B-8-18	Basisgebäudemodell	Buffer Storage Model	8 kg/Tag	$T_{VL} = 18\text{ °C}$
E-B-3-kk	Erweitertes Gebäudemodell	Buffer Storage Model	3.8 kg/Tag	ideal geheizt, keine Kühlung
E-B-3-18	Erweitertes Gebäudemodell	Buffer Storage Model	3.8 kg/Tag	$T_{VL} = 18\text{ °C}$
E-B-8-18	Erweitertes Gebäudemodell	Buffer Storage Model	8 kg/Tag	$T_{VL} = 18\text{ °C}$
E-B-8-17	Erweitertes Gebäudemodell	Buffer Storage Model	8 kg/Tag	$T_{VL} = 17\text{ °C}$
E-B-8-16	Erweitertes Gebäudemodell	Buffer Storage Model	8 kg/Tag	$T_{VL} = 16\text{ °C}$
E-B-8-15	Erweitertes Gebäudemodell	Buffer Storage Model	8 kg/Tag	$T_{VL} = 15\text{ °C}$
E-B-8-14	Erweitertes Gebäudemodell	Buffer Storage Model	8 kg/Tag	$T_{VL} = 14\text{ °C}$
E-B-8-opt	Erweitertes Gebäudemodell	Buffer Storage Model	8 kg/Tag	$T_{VL, opt}$

4.2 Grundlegende Ergebnisse der durchgeführten Simulationsstudie

In Abbildung 4-1 sind sogenannte Jahresdauerlinien der operativen Raumtemperatur einiger relevanter Simulationsszenarien gezeigt. Zu Beginn dieser Diplomarbeit wurde ein Szenario (B-S-0-kk) berechnet, in dem die Fensterflächen dieser Wohnung nicht verschattet wurden. Außerdem ist in dieser Variante keine Kühlung der Wohnung vorgesehen. Man sieht, dass sich dadurch in rund 3600 Stunden eine operative Raumtemperatur über 26 °C einstellt bzw. diese etwa 2000 Stunden im Jahr über 30 °C liegt. Die darunterliegende Jahresdauerlinie (B-S-3-kk) zeigt jene Variante, die zwar auch über keine aktive Kühlung, dafür aber über eine Verschattung der Fenster verfügt. Auch hier stellen sich etwa 2000 Stunden im Jahr operative Raumtemperaturen über 26 °C ein.

Hinsichtlich der operativen Raumtemperatur verhalten sich jene Szenarien mit einer aktiven Kühlung über den Fußboden (B-S-3-18, E-B-3-18, E-B-8-14, E-B-8-opt) sehr ähnlich. Die in wenigen Stunden des Jahres über 26 °C liegenden Temperaturen sind bedingt durch die

4 Analyse der Simulationsergebnisse

Trägheit der Systemregelung. Jedenfalls ist erkennbar, dass es gelingt die operative Raumtemperatur weitgehend auf ein Niveau unter 26 °C zu senken.

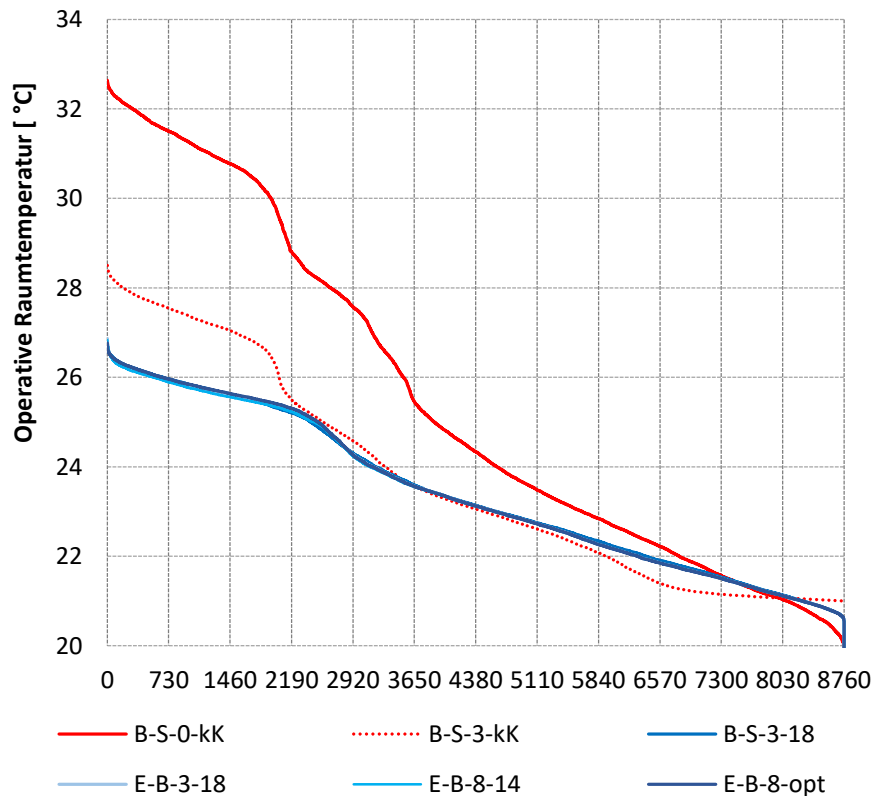


Abbildung 4-1: Jahresdauerlinien verschiedener Szenarien im Vergleich

In all diesen Varianten sind dieselben internen Wärmeeinträge durch Personen, Geräte und Beleuchtung mitberücksichtigt worden, auch wurden die Infiltration und die Lüftungsparameter nicht verändert. Das zeigt, dass allein durch das Verwenden eines Sonnenschutzes die Raumlufttemperatur signifikant gesenkt werden kann. Aber das allein führt nicht zu einem behaglichen Raumklima in den Sommermonaten. Vergleicht man wie in Abbildung 4-5 gezeigt die Temperaturfelder nach EN ISO 7730 (2006) einer Variante ohne aktive Kühlung (links) mit jener mit aktiver Fußbodenkühlung bei 18 °C Vorlauftemperatur (rechts) ist eindeutig erkennbar, wie in den Sommermonaten ($\Theta_{e,Tag} > 20^{\circ}\text{C}$) das Temperaturniveau der operativen Raumtemperatur nach unten in den behaglichen Bereich „gedrückt“ wird.

4 Analyse der Simulationsergebnisse

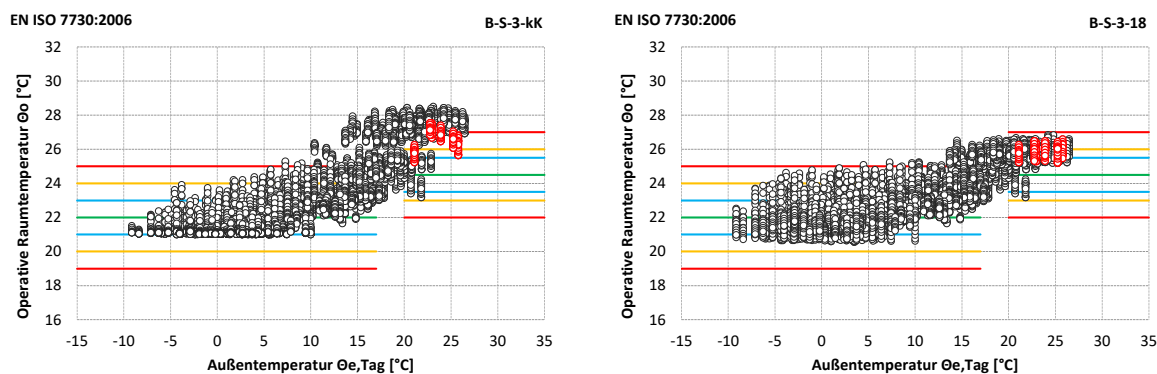


Abbildung 4-2: Vergleich der Temperaturfelder ohne (links) bzw. mit aktiver Kühlung über den Fußboden (rechts)

Ein Blick auf die Auswertung der Anzahl der Stunden je Kategorie (vgl. Tabelle 4-3) quantifiziert diesen Eindruck. Insgesamt sind 1344 Stunden dem Sommer ($\Theta_{e,Tag} > 20^\circ\text{C}$) zugeordnet. In der Variante ohne Kühlung ist im Sommer das Kriterium der Kategorie C in 72% (knapp 1000 h) nicht einzuhalten, wohingegen bei aktiver Kühlung ein Überschreiten dieses Kriteriums ausgeschlossen ist. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Nutzung einer aktiven Fußbodenkühlung zur Erreichung eines behaglichen Wohnraumklimas beitragen kann.

Tabelle 4-3: Vergleich der Stundenhäufigkeiten je Kategorie der in Abbildung 4-5 angeführten Varianten

B-S-3-kK	$\Theta_{e,Tag} > 20^\circ\text{C}$		Sommerwoche		B-S-3-18	$\Theta_{e,Tag} > 20^\circ\text{C}$		Sommerwoche	
	[hr]	[-]	[hr]	[-]		[hr]	[-]	[hr]	[-]
> Obergrenze	966	72%	44	26%	> Obergrenze	0		0	
Kat. C, oben	208	15%	98	58%	Kat. C, oben	523	39%	81	48%
Kat. B, oben	28	2%	20	12%	Kat. B, oben	525	39%	62	37%
Kat. A, oben	89	7%	6	4%	Kat. A, oben	243	18%	25	15%
Kat. A, unten	42	3%	0		Kat. A, unten	42	3%	0	
Kat. B, unten	11	1%	0		Kat. B, unten	11	1%	0	
Kat. C, unten	0		0		Kat. C, unten	0		0	
< Untergrenze	0		0		< Untergrenze	0		0	
Summe:	1344	100%	168	100%	Summe:	1344	100%	168	100%

Die hier durchgeführte Simulationsstudie kann als Basisstudie verstanden werden, da wesentliche Einflussgrößen nicht variiert wurden. Mit Hilfe der Ergebnisse ist ein erster Eindruck entstanden, wie sich eine derartige Wohnung mit Fußbodenkühlung verhalten wird, aber der Einfluss des Nutzers, außer bei den eingebrachten Feuchtelasten, wurde weitgehend nicht beachtet. Ein häufigeres Lüften bei hohen Raumluftfeuchten (Austausch mit trockenerer Außenluft) oder in den Nachtstunden (Temperaturabsenkung durch Nachtlüftung) sind in dieser Simulationsstudie nicht implementiert. Weiters wäre es vorstellbar, die Kühlung nur zu gewissen Zeiten zu betreiben, sodass die Bewohner z.B. nach der Arbeit in eine „gut temperierte“ Wohnung kommen, oder etwa die Kühlung nur in den Nachtstunden verfügbar ist. Dies würde jedenfalls die Ergebnisse hinsichtlich der Behaglichkeit sehr stark beeinflussen.

4 Analyse der Simulationsergebnisse

In Bezug auf die Kondensation wurden Kompromisse eingegangen, denn ein zeitgleiches Anfallen der Feuchtelasten im Raum und im Fußboden wird real so nicht vorkommen und stellt den denkbar schlechtesten Fall dar. Mit den in TRNSYS (2017) zur Verfügung stehenden Mitteln ist aber der Feuchtetransport im Fußboden nicht zufriedenstellend abbildbar und der Wechsel in eine andere Simulationsumgebung wie z.B. WUFI oder Delphin wäre für weiterführende, detailliertere Betrachtungen empfehlenswert. Außerdem sei angemerkt, dass der Einfluss der im „Moisture Storage Model“ verwendeten Parameter und die Definition des Oberflächen- und Tiefenspeichers nur für die vorliegende Referenzwohnung nicht tiefergehend analysiert wurde (vgl. 2.4.2 b bzw. Kapitel 3.4). Entsprechende Vorschläge werden in Kapitel 6 behandelt, die Detailergebnisse können dem Anhang entnommen werden.

Die wichtigsten Kenngrößen der Fußbodenkühlung ist für alle berechneten Varianten in den beiden folgenden Tabellen zusammengefasst, wobei Tabelle 4-4 alle Varianten mit dem einfachen Gebäudemodell (vgl. Abbildung 3-1) enthält und in Tabelle 4-5 die Varianten unter Verwendung des erweiterten Gebäudemodells (ebenso Abbildung 3-1) angeführt sind, eine grafische Darstellung der Varianten des erweiterten Gebäudemodells in Abbildung 4-3 erfolgt.

In Tabelle 4-4 wurde für jede Variante eine Vorlauftemperatur von 18 °C gewählt, außer bei „B-S-3-kk“ (vgl. Anhang A1). Dieses Szenario wurde berechnet, um prinzipiell darstellen zu können, welchen Effekt die Fußbodenkühlung auf die gewählte Referenzwohnung hat. Bei den weiteren Varianten geht es hauptsächlich darum, welchen Effekt die Variation der verwendeten Feuchtemodelle hat bzw. ob oder welcher Unterschied sichtbar ist, wenn nicht die relativ niedrigen Feuchtelasten gemäß SIA 2024 (2015) verwendet werden.

Tabelle 4-4: Zusammengefasste Ergebnisse der Varianten „Basisgebäudemodell“

	B-S-3-kk	B-S-3-18	B-S-8-18	B-B-3-18	B-B-8-18	
abgeführte Wärmemenge	0	274	274	274	274	kWh/a
abgeführte Wärmemenge, spez.	0.0	5.7	5.7	5.7	5.7	kWh/(m ² a)
aktive Kühlung	0	214	214	214	214	hr
mittlere Temperaturabsenkung	0.0	1.6	1.6	1.6	1.6	K
maximale Temperaturabsenkung	0.0	2.4	2.4	2.4	2.4	K
Dauer Kondensation Parkett	0:00	0:00	11:05	0:00	0:00	hr

Vergleicht man die Varianten B-S-3-18 (siehe auch Anhang A2) und B-S-8-18 (siehe Anhang A3) wurden bei zweitgenannter die höheren Feuchtelasten in die Wohnung eingebracht. Dies führt dazu, dass es an der Parkettoberfläche zu Kondensation kommt, was darauf

4 Analyse der Simulationsergebnisse

zurückzuführen ist, dass hier absolut mehr Wasser in der Raumluft vorhanden ist. Bei diesen beiden Varianten wurde mit dem einfachen Feuchtemodell gerechnet, in dem, wie in Abschnitt 2.4.2 beschrieben, die Änderung der Feuchte des Luftknotens in Abhängigkeit eines konstanten Faktors berechnet wird. Bringt man nun über die internen Feuchtequellen (vgl. Gl. 2-19) mehr Feuchte in den Luftknoten ein, ist steigt die absolute Feuchte des Luftknoten stärker an und ein Auskondensieren an kühlen Oberflächen (Parkettoberfläche) wird wahrscheinlicher.

Betrachtet man die weiteren beiden Varianten B-B-3-18 (vgl. Anhang A4) und B-B-8-18 (vgl. Anhang A5), bei mit dem „Buffer Storage Model“ (vgl. 2.4.2 b) berechnet, wird hier der Einfluss der erhöhten Feuchtelasten in Form von auftretender Kondensation nicht sichtbar. Die erhöhte Luftfeuchte wird von den Umschließungsflächen aufgenommen und ein Auskondensieren an der Fußbodenoberfläche tritt nicht auf.

Die in Tabelle 4-5 gezeigten Ergebnisse wurden allesamt unter Verwendung des „Buffer Storage Models“ im erweiterten Gebäudemodell (vgl. Abbildung 3-1) ermittelt, wodurch die Dauer von Kondensationsauftritten an der Estrichoberfläche ausgewiesen werden kann (vgl. letzte Zeile). Grundsätzlich ist die dem Raum entnommene Wärmemenge bei allen Varianten in etwa gleich hoch, lediglich in der Variante E-B-8-opt (siehe Anhang A8) ist diese um etwa 20% geringer. Dies ist zurückzuführen auf eine geringere Kühlleistung bedingt durch die taupunktgeführte Vorlauftemperatur. Ebendiese führt auch zu einer erhöhten Einschaltzeit dieser Variante, was unter Anhang A8 in Abbildung A56 gezeigt ist. Hier ist sichtbar, dass das Ausschaltkriterium der Fußbodenkühlung ($T_{\text{Raum}} \leq 25 \text{ °C}$) über mehrere Tage nicht erreicht wird. Der Einfluss der Vorlauftemperatur wird und die Auswirkung der eingebrachten Feuchtelasten wird in Abschnitt 4.4.1 bzw. 4.4.2 genauer erläutert. Es sei kurz angemerkt, dass je niedriger die Vorlauftemperatur wird, die Einschaltzeit der Fußbodenkühlung verringert wird, jedoch die Dauer von Kondensationsereignissen an der Parkett- und der Estrichoberfläche zunehmen. Die in Tabelle 4-5 gezeigten Ergebnisse sind in Abbildung 4-3 grafisch dargestellt.

4 Analyse der Simulationsergebnisse

Tabelle 4-5: Zusammengefasste Ergebnisse der Varianten „Erweitertes Gebäudemodell“

	Var05 E-B-3-18	Var06 E-B-8-18	Var07 E-B-8-17	Var08 E-B-8-16	Var09 E-B-8-15	Var10 E-B-8-14	Var11 E-B-8-opt	
abgeführte Wärmemenge	272	272	269	268	273	276	216	kWh/a
abgeführte Wärmemenge, spez.	5.6	5.6	5.6	5.6	5.7	5.7	4.5	kWh/(m²a)
aktive Kühlung	222	222	191	170	158	148	381	hr
mittlere Temperaturabsenkung	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.7	1.4	K
maximale Temperaturabsenkung	2.4	2.4	2.4	2.5	2.6	2.7	2.3	K
Dauer Kondensation Parkett	0:00	3:05	2:10	2:05	4:05	3:35	0:00	hr
Dauer Kondensation Estrich	0:00	5:17	5:05	5:25	12:05	15:10	0:00	hr

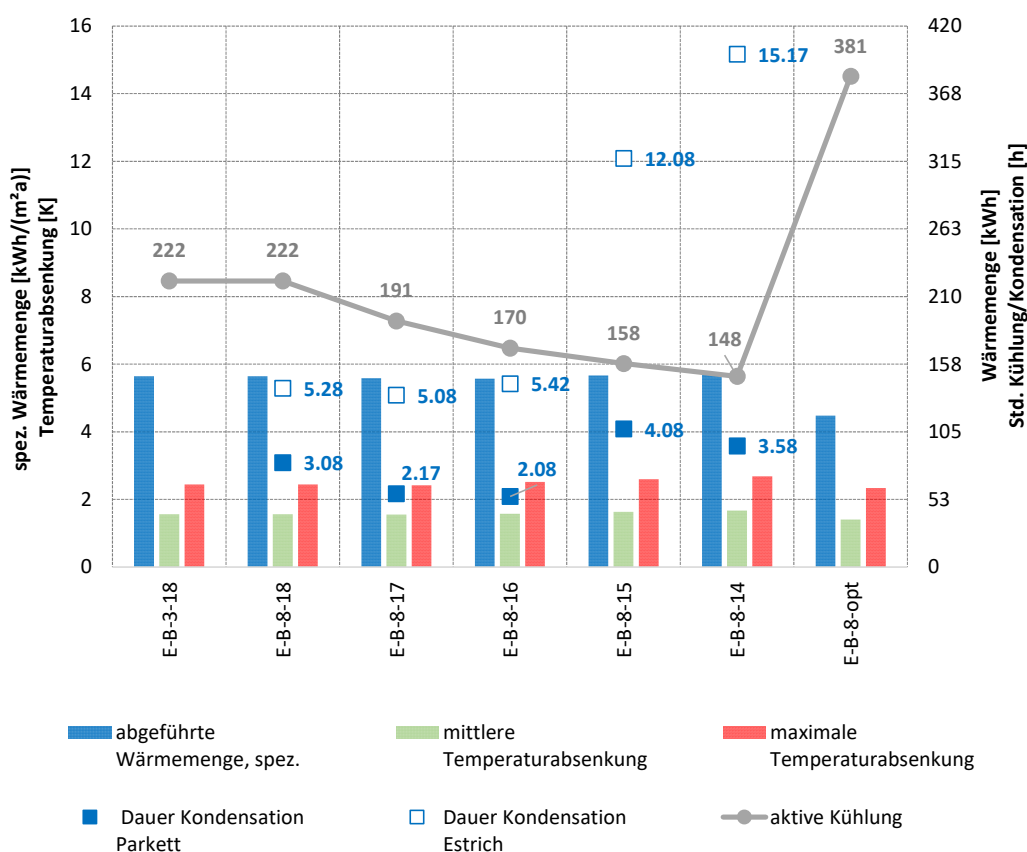


Abbildung 4-3: Grafische Darstellung der Simulationsergebnisse „Erweitertes Gebäudemodell“

4.3 Detaillierte Ergebnisse am Beispiel einer ausgewählten Variante

Die durchgeführten Auswertungen werden anhand der Variante E-B-8-18 gezeigt, wobei es im Wesentlichen darum geht, die folgenden in Kapitel 1.2 formulierten Fragen zu klären: Kann unter den gegebenen Randbedingungen hinsichtlich der Fußbodenkühlung (Variation der Vorlauftemperatur) der für die Referenzwohnung erforderliche Kühlbedarf von rund

4 Analyse der Simulationsergebnisse

220 kWh/a erreicht werden? Dieser Wert wurde ermittelt, in dem ein Simulationsdurchgang durchgeführt wurde, in dem die Wohnung ideal auf 26 °C Raumlufttemperatur gekühlt wird.

Inwieweit spielt Kondensation eine Rolle bzw. wie lange kommt es in Summe zu Kondensationsereignissen?

Wie verhält es sich hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit? Können die in den einschlägigen Normen geforderten Temperaturgrenzen eingehalten werden, wobei dies einerseits grafisch und andererseits quantitativ auf Stundenbasis ausgewertet wird. Bei der grafischen Auswertung sind die geforderten Temperaturgrenzen in den jeweiligen Diagrammen eingezeichnet, bei der quantitativen Auswertung wird die Anzahl der Jahresstunden in den jeweiligen Kategorien angeführt.

4.3.1 Szenario E-B-8-18

Bei den hier gezeigten Auswertungen handelt es sich um ein Szenario, in dem das erweiterte Gebäudemodell verwendet wird. Der Vorteil hierbei ist, dass vor allem der Fußbodenaufbau besser erfasst werden kann, v.a. durch die zusätzliche Möglichkeit der Auswertung der Temperatur an der Estrichoberfläche und der dort auftretenden Kondensationsereignisse.

a) Kenngrößen Fußbodenkühlung

Im hier erläuterten Szenario wird eine Wärmemenge von 272 kWh/a abgeführt, was spezifisch einen Wert von 5,6 kWh/(m²a) bedeutet, wenn man auf die Bruttofläche von 48 m² (Wohnraum und Schlafzimmer) bezieht, wie z.B. auch im Energieausweis üblich. Die operative Temperatur im Wohnraum kann im Schnitt im Vergleich zu einer ungekühlten Variante um 1,6 K, maximal jedoch um 2,4 K abgesenkt werden. Durch die erhöhten eingebrachten Feuchtelasten von 8 kg/Tag kommt es sowohl an der Fußbodenoberfläche, als auch am Estrich selbst zu Kondensation, was wahrscheinlich nicht der moderaten Vorlauftemperatur von 18 °C geschuldet ist, wie man später im Vergleich mit der Variante E-B-3-18 (vgl. Kapitel 4.4.1) erkennen kann. Natürlich hat die Vorlauftemperatur prinzipiell einen wesentlichen Einfluss auf das mögliche Auftreten von Kondensation, der Vergleich der Simulationsergebnisse von Varianten mit gleicher Vorlauftemperatur zeigt aber, dass bei jenen Varianten mit der höheren Feuchtelast die Luft eher gesättigt ist und Kondensat auch auf der Fußbodenoberfläche anfällt, die aber eigentlich eine höhere Temperatur aufweist als die Estrichoberfläche. Zusammengefasst sind die Ergebnisse in Tabelle 4-6.

4 Analyse der Simulationsergebnisse

Tabelle 4-6: Wesentliche Ergebnisse der Fußbodenkühlung für Variante E-B-8-18

abgeführte Wärmemenge	272	kWh/a		
abgeführte Wärmemenge, spez.	5.64	kWh/(m ² a)		
aktive Kühlung	222	h		
mittlere Temperaturabsenkung	1.6	K		
maximale Temperaturabsenkung	2.4	K		
Dauer Kondensation Parkett	3	h	5	min
Dauer Kondensation Estrich	5	h	17	min

Es folgt nun die grafische Darstellung (siehe Abbildung 4-4) der sich einstellenden Wohnraumtemperatur (T_WR), der Oberflächentemperatur des Fußbodens (T_Parkett), der Außenlufttemperatur (T_amb) und der spezifischen Heiz- und Kühlleistungen (Q_heat,WR,spez bzw. Q_cool,WR,spez).

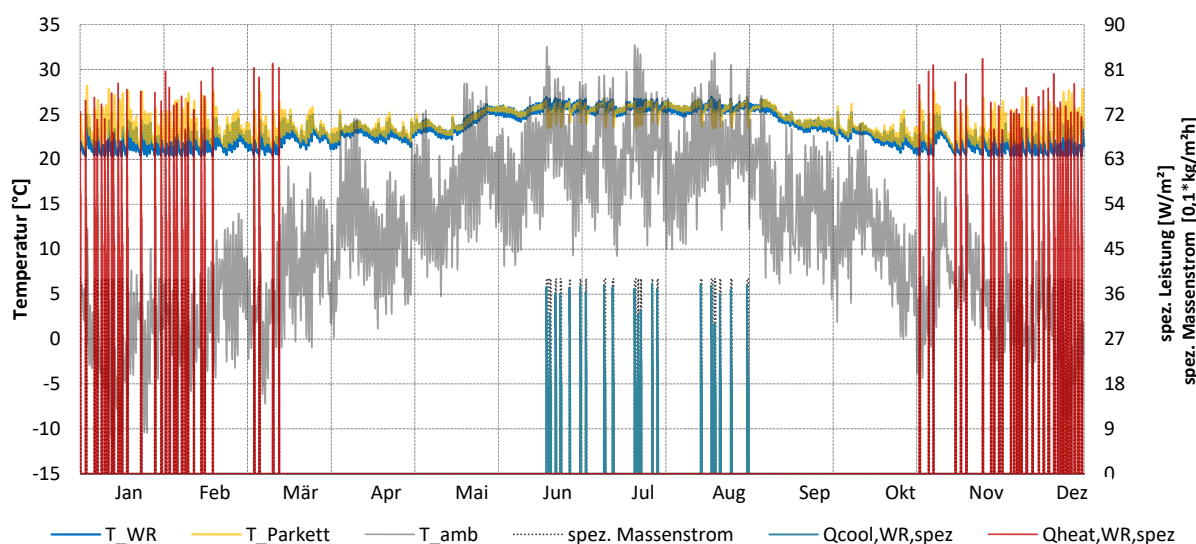


Abbildung 4-4: Jahresverlauf der Simulationsergebnisse für die Wohnraumkühlung der Variante E-B-8-18

In den Sommermonaten (Juni – August) sieht man, dass die Fußbodenkühlung immer wieder aktiv wird, wobei Anfang August aufgrund der niedrigen Außenlufttemperatur eine aktive Kühlung offensichtlich nicht notwendig ist um eine Raumlufttemperatur von rund 26 °C zu halten.

Die beiden nachfolgenden Auswertungen beschränken sich in ihrer Darstellung auf eine heiße Sommerwoche im Juni.

In Abbildung 4-5 sind die an der Fußbodenoberseite (T_Parkett) und am Estrich (T_Estrich) vorhandenen Temperaturen (linke Achse) gezeigt in Kombination mit der spezifischen Kühlleistung (Q_cool,WR,spez) und dem 0,1-fachen des spezifischen Massenstroms (beide rechte Achse), wobei dies aus darstellungstechnischen Gründen so gewählt wurde. In dieser Woche werden viermal die Einschaltkriterien der Fußbodenkühlung (vgl. 3.1) erreicht und

4 Analyse der Simulationsergebnisse

diese wird aktiviert. Mit Einschalten der Fußbodenkühlung nehmen die beiden Temperaturen ab, wobei die Estrichtemperatur immer ein Stück unter der Oberflächentemperatur am Parkett liegt. Das Parkett ist ja auch einer solaren Einstrahlung ausgesetzt und somit prinzipiell wärmer. Sobald die Kühlung wieder deaktiviert ist, ist ein Ansteigen der beiden Temperaturen ersichtlich.

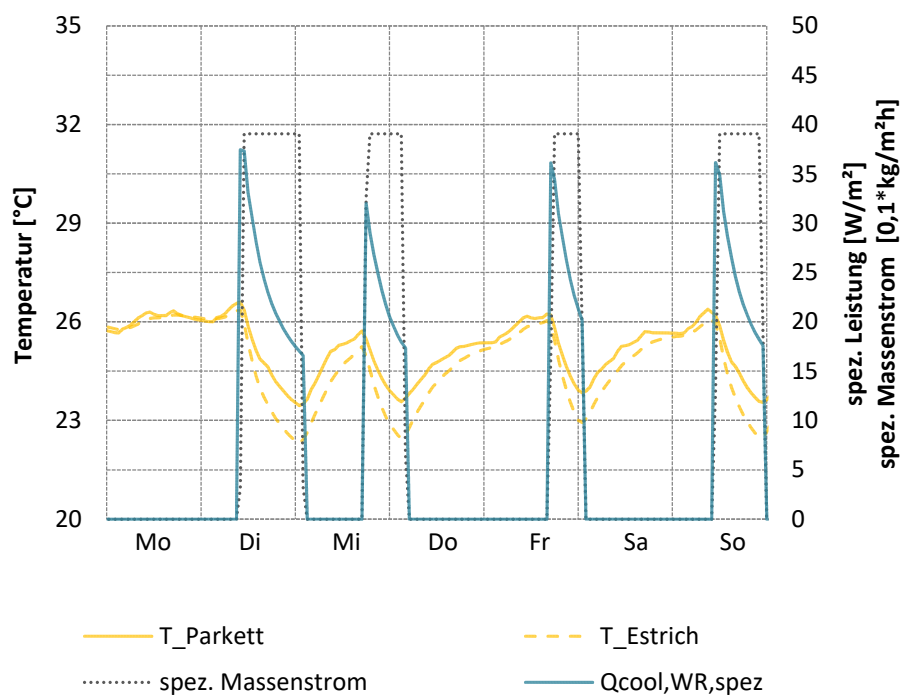


Abbildung 4-5: Simulationsergebnisse einer „heißen Sommerwoche“ der Variante E-B-8-18

In Abbildung 4-6 sind wiederum die beiden Temperaturen (T_{Parkett} , T_{Estrich}) dargestellt, zusätzlich aber auch Kenngrößen des Raumes wie dessen Raumlufttemperatur (T_{WR}), die operative Raumtemperatur (TOP_{WR}) und die relative Raumluftfeuchte (RH_{WR}). Der berechnete PPD-Index (PPD_{WR}) findet sich im unteren Diagrammbereich in Grün. Es ist sichtbar, dass dieser stark mit der Raumlufttemperatur korreliert, also ansteigt, je höher diese ist.

An die beiden Bodentemperaturen gekoppelt wird das Auftreten von Kondensation in Form von Markern gekennzeichnet, wobei zwischen Kondensation an der Parkettoberfläche (ausgefülltes blaues Quadrat) und Kondensation an der Estrichoberfläche (weiß gefülltes, blau gerahmtes Quadrat) unterschieden wird, eine Aussage über die Dauer der Kondensationsauftritte wird kumuliert in Tabelle 4-6 angegeben. Die Kondensation an der Fußbodenoberfläche selbst ist i.d.R. durch im jeweiligen Simulationszeitschritt auftretende Spitzen der relativen Raumluftfeuchte bedingt. Am Estrich kommt es aufgrund der niedrigeren

4 Analyse der Simulationsergebnisse

Temperatur öfter zu Kondensation, wobei diese im betrachteten Zeitraum nur bei aktiver Kühlung auftritt (siehe Abbildung 4-6).

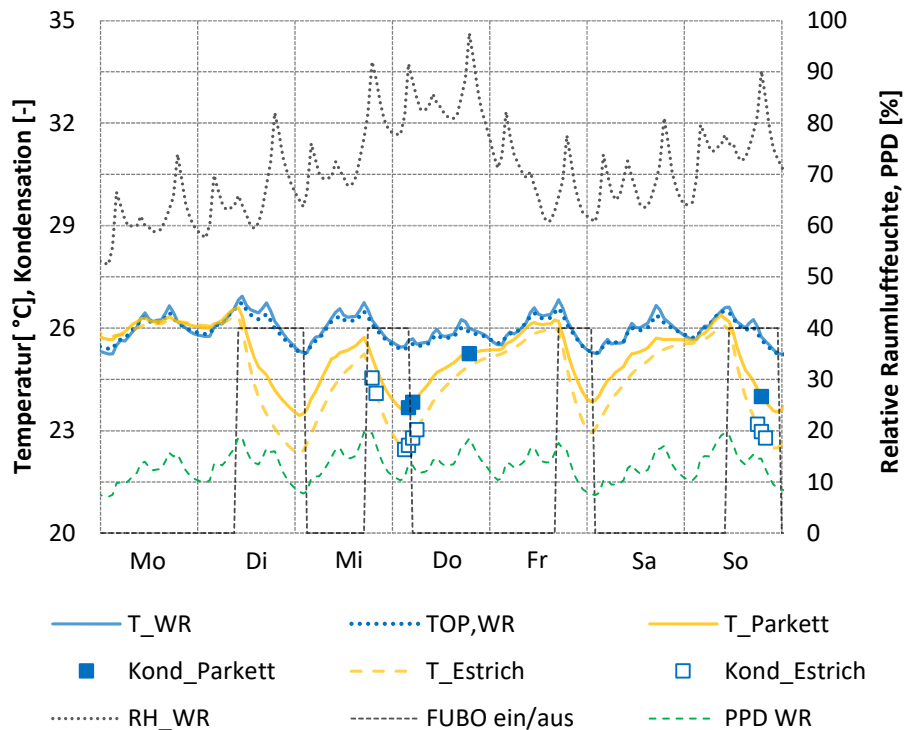


Abbildung 4-6: Darstellung der Kondensationsereignisse in Relation zur relativen Luftfeuchte im Raum der Variante E-B-8-18

b) Ergebnisse der Behaglichkeitsauswertung

Zuerst erfolgt eine Darstellung der operativen Raumtemperatur in Abhängigkeit der mittleren Tagesaußenlufttemperatur wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben. Der generelle Diagrammaufbau ist dort bereits erwähnt, anhand Abbildung 4-7 kann erläutert werden, dass den mittleren Tagesaußenlufttemperaturen ($\Theta_{e,Tag}$, 365 Werte) die jeweiligen operativen Raumtemperaturen zugeordnet werden. So ergeben sich bei einer Jahresauswertung 365 Punktesäulen, wobei ein guter optischer Eindruck entsteht, ob das dargestellte Szenario den Temperaturempfehlungen entspricht, also sich die Punktesäulen innerhalb der jeweiligen Grenzlinien befinden. Abbildung 4-7 zeigt, dass man durch die aktive Kühlung die nach dieser Norm geforderten Temperaturgrenzen auch in den Sommermonaten ($\Theta_{e,Tag} \geq 20 \text{ °C}$) einhalten kann, wobei die Verhältnisse in der heißen Sommerwoche separat in Rot hervorgehoben sind. Man sieht allerdings auch, dass sich eher operative Raumtemperaturen im oberen Grenzbereich (Kat. C) einstellen.

4 Analyse der Simulationsergebnisse

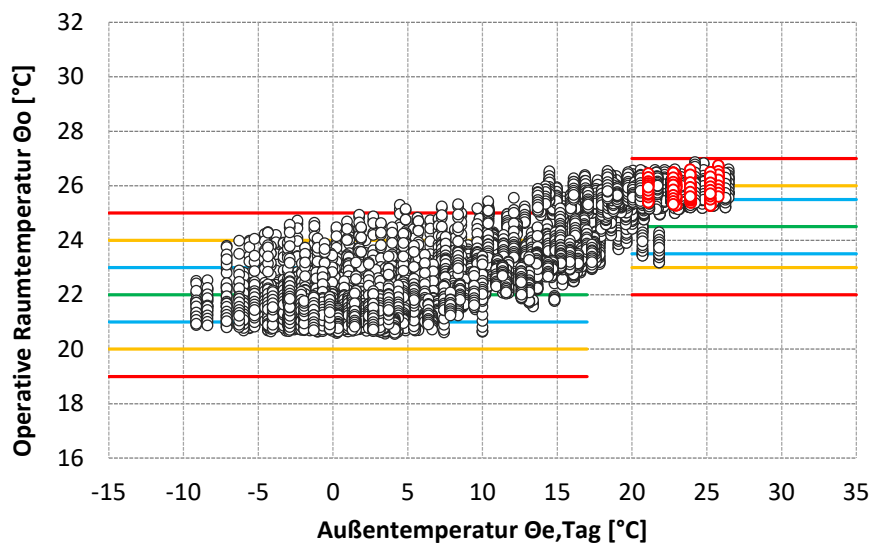


Abbildung 4-7: Simulationsergebnisse (Stundenmittelwerte) der Variante E-B-8-18 nach EN ISO 7730 (2006)

Zusätzlich zur grafischen Darstellung wurde eine quantitative Auswertung der Stundenwerte durchgeführt, um konkret benennen zu können, für wieviele Stunden die operative Raumtemperatur sich innerhalb welcher Kategorie (A, B oder C) befindet, bzw. für wieviele Stunden sich der Raum außerhalb der angeführten Grenzen bewegt (vgl. Tabelle 2-4). Tabelle 4-7 ist einerseits zu entnehmen, dass zu 1344 Stunden das Tagesmittel der Außenlufttemperatur über 20 °C liegt. Andererseits sieht man, dass in dieser Variante niemals die obere Begrenzung der Kategorie C (> Obergrenze) überschritten wird und sich die Temperaturen in der heißen Sommerwoche zumindest zu 15% innerhalb des oberen Temperaturbandes der Kategorie A befinden.

Tabelle 4-7: Stundenhäufigkeitsverteilung nach EN ISO 7730 (2006) der Variante E-B-8-18

E-B-8-18	$\Theta_{e, \text{Tag}} > 20 \text{ °C}$		Sommerwoche	
	[h]	[-]	[h]	[-]
> Obergrenze	0		0	
Kat. C, oben	460	34%	73	43%
Kat. B, oben	579	43%	70	42%
Kat. A, oben	257	19%	25	15%
Kat. A, unten	37	3%	0	
Kat. B, unten	11	1%	0	
Kat. C, unten	0		0	
< Untergrenze	0		0	
Summe:	1344	100%	168	100%

Eine Auswertung bezogen auf die Temperaturkriterien nach DIN 15251 (2007) ergibt, dass im Sommerfall die operativen Raumtemperaturen überwiegend in der besten Kategorie I angesiedelt sind. Lediglich im Bereich von ca. 13 °C gleitendem Mittelwert der Außenlufttemperatur Θ_{rm} gibt es einen Ausreißer in die zweitbeste Kategorie II. Da diese Norm allerdings ersetzt wurde, entfällt hier eine Häufigkeitsauswertung.

4 Analyse der Simulationsergebnisse

DIN 15251:2007

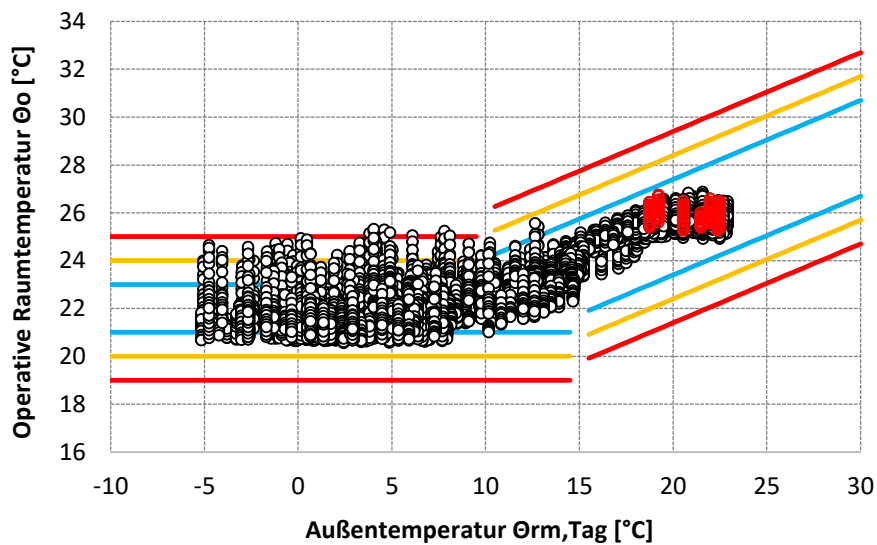


Abbildung 4-8: Temperaturfeld der Variante E-B-8-18 nach DIN 15251 (2007)

Eine Auswertung der EN 16798-1 (2019) zeigt ein ähnliches Bild wie in Abbildung 4-9, wobei hier ja zusätzlich die Komforttemperatur grün gekennzeichnet ist und außerdem der Übergang zwischen Sommer- und Winterfall bei $\Theta_{rm} = 10$ °C für die Ober- und Untergrenzen gleichermaßen fixiert ist.

DIN 16798-1:2019

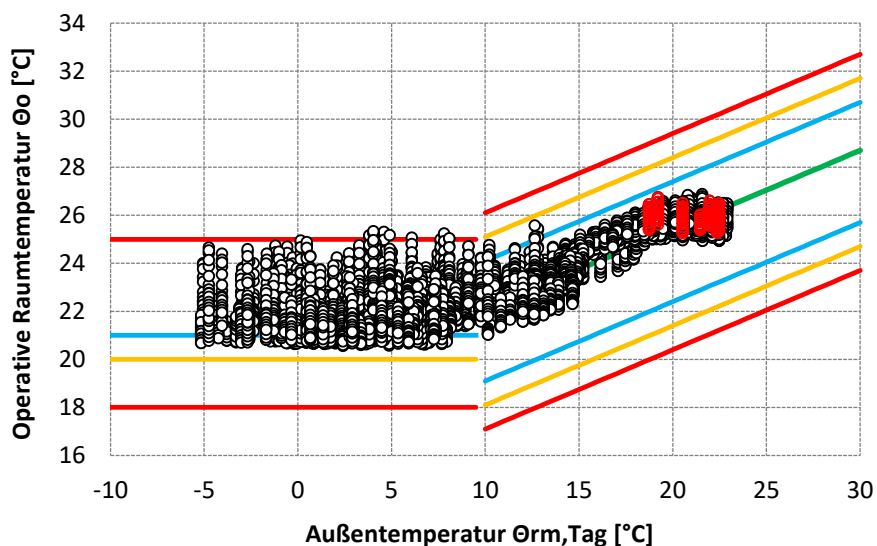


Abbildung 4-9: Temperaturfeld der Variante E-B-8-18 nach EN 16798-1 (2019)

Die Häufigkeitsauswertung nach Tabelle 4-8 zeigt, dass die operative Raumtemperatur praktisch den gesamten Sommer innerhalb der besten Kategorie ist. Im Vergleich zur Häufigkeitsauswertung nach EN ISO 7730 (2006) fällt auf, dass laut der dortigen Definition der Temperaturgrenzen des Sommerfalls wesentlich mehr Stunden (4728 h) dem Sommer zugeordnet werden.

4 Analyse der Simulationsergebnisse

Tabelle 4-8: Häufigkeitsauswertung der Variante E-B-8-18 gemäß der Kriterien nach EN 16798-1 (2019)

E-B-8-18	$\Theta_{\text{rm, Tag}} > 10 \text{ °C}$		Sommerwoche	
	[h]	[-]	[h]	[-]
> Obergrenze	0		0	
Kat. C, oben	0		0	
Kat. B, oben	7	0%	0	
Kat. A, oben	2 874	61%	88	52%
Kat. A, unten	1 847	39%	80	48%
Kat. B, unten	0		0	
Kat. C, unten	0		0	
< Untergrenze	0		0	
	4728		168	

Betrachtet man nun zusätzlich die Auswertung der relativen Raumluftfeuchte in Verbindung mit der operativen Raumtemperatur, so zeigt sich ein weniger optimales Bild (vgl. Abbildung 4-10). In Kombination mit einer Häufigkeitsauswertung wie in Tabelle 4-9 aufgelistet ist eine gleichmäßige Aufteilung auf alle drei Bereiche (angenehm, ausreichend und unbehaglich) sichtbar, wobei die Anzahl der Stunden innerhalb des unbehaglichen Bereichs geringfügig kleiner ist als jene innerhalb des angenehmen bzw. ausreichend behaglichen Bereichs.

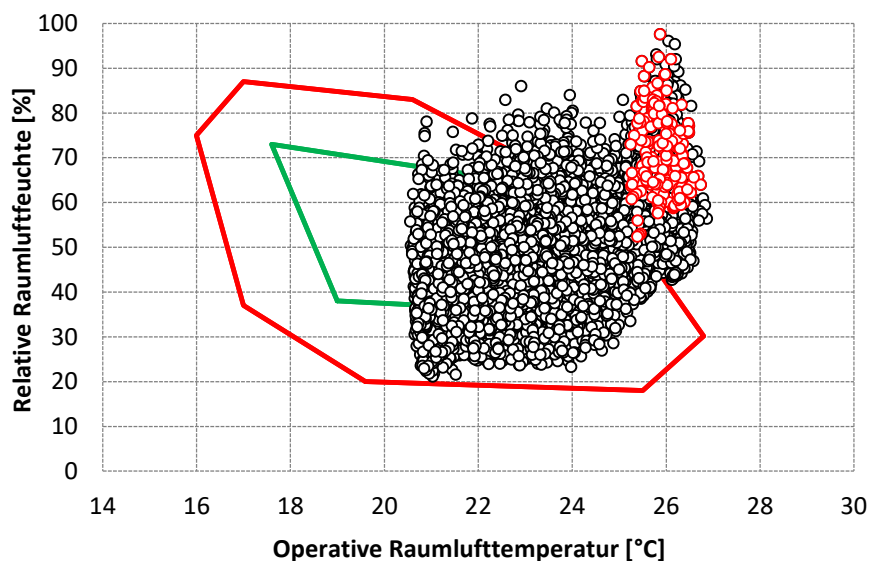


Abbildung 4-10: Stundenwerte relativer Raumluftfeuchte in Abhängigkeit der operativen Raumtemperatur für Variante E-B-8-18

4 Analyse der Simulationsergebnisse

Allerdings sind die Raumluftfeuchten in der heißen Sommerwoche zur Gänze im unbehaglichen Bereich angesiedelt.

Tabelle 4-9: Auswertung der Stunden nach Bereich der Variante E-B-8-18

E-B-8-18	Jahr		Sommerwoche	
	[h]	[-]	[h]	[-]
angenehm behaglich	3 194	36%	0	0%
ausreichend behaglich	3 133	36%	0	0%
unbehaglich	2 433	28%	168	100%
Summe	8 760	100%	168	100%

Abschließend wird noch die Auswertung der PMV- bzw. PPD Indizes (vgl. Abschnitt 2.1.1) gezeigt. Bezogen auf den PMV-Index verhält es sich so, dass das Raumklima größtenteils als angenehm empfunden bzw. eher als etwas kühl denn zu warm wahrgenommen wird. In der Sommerwoche erreicht der Anteil der Unzufriedenen maximal rund 20%.

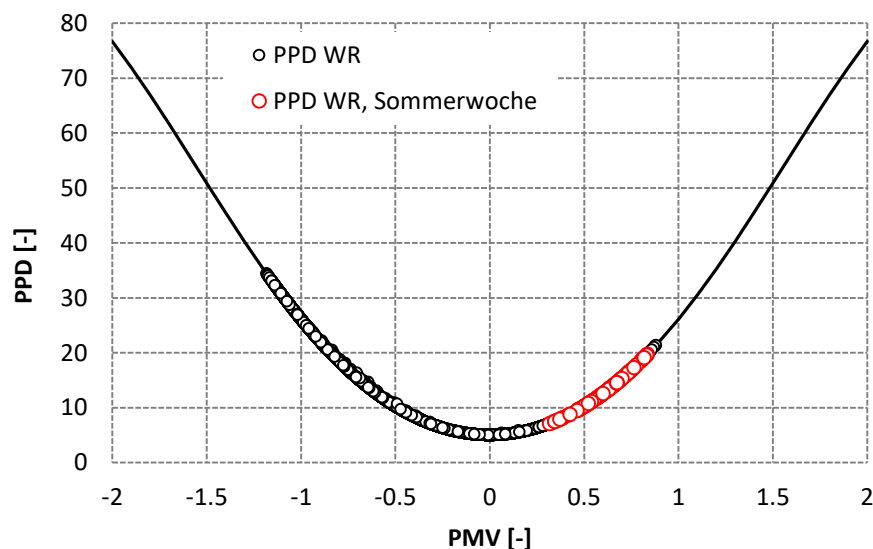


Abbildung 4-11: PMV- und PPD-Index der Variante „E-B-8-18“

4.4 Ausgewählte Vergleiche

Nach der detaillierten Darstellung der Auswertungsergebnisse der Variante E-B-8-18 wird in diesem Kapitel auf ausgewählte Vergleiche eingegangen, um diverse Einflussfaktoren sichtbar zu machen. Es wird der Vergleich zweier Varianten mit unterschiedlicher Vorlauftemperatur gezeigt, die Auswirkungen der höheren Feuchtelast im Vergleich zur geringeren und die Auswirkungen der Wahl des Feuchtmodells werden erläutert.

4.4.1 Auswirkung der Vorlauftemperatur

Betrachtet man die wesentlichen Ergebnisse der Varianten E-B-8-18 und E-B-8-14 (vgl. Tabelle 4-10) so sieht man, dass in beiden Fällen die abgeführte Wärmemenge und die wirkenden Temperaturabsenkungen ähnlich groß sind. Der signifikanteste Unterschied ist in der Dauer des Kühlbetriebs zu sehen. Mit der höheren Vorlauftemperatur benötigt man mehr Stunden aktiver Kühlung, da hier aufgrund der kleineren Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf- und Raumtemperatur weniger Wärmeleistung je Einschaltzyklus abgeführt werden kann. Es folgt, dass man bei einer geringeren Vorlauftemperatur weniger oft kühlen muss. Hinsichtlich der Kondensation sei gesagt, dass die Dauer der Kondensation an der Parkettoberfläche bei beiden Varianten ähnlich hoch ist, während bei der Variante E-B-8-14 an der Estrichoberfläche wesentlich häufiger Kondensation auftritt. Dies lässt den Schluss zu, dass die Kondensation an der Fußbodenoberfläche primär von der hohen Raumluftfeuchte abhängig ist und nicht unbedingt nur von der gewählten Vorlauftemperatur, wobei aufgrund der gewählten Methodik keine quantitative Aussage über die Kondensationsereignisse getroffen werden kann.

Tabelle 4-10: Vergleich der wesentlichen Ergebnisse bei 18 °C und 14 °C Vorlauftemperatur

E-B-8-18

abgeführte Wärmemenge	272	kWh/a		
abgeführte Wärmemenge, spez.	5.64	kWh/(m ² a)		
aktive Kühlung	222	h		
mittlere Temperaturabsenkung	1.6	K		
maximale Temperaturabsenkung	2.4	K		
Dauer Kondensation Parkett	3	h	5	min
Dauer Kondensation Estrich	5	h	17	min

E-B-8-14

abgeführte Wärmemenge	276	kWh/a		
abgeführte Wärmemenge, spez.	5.74	kWh/(m ² a)		
aktive Kühlung	148	h		
mittlere Temperaturabsenkung	1.7	K		
maximale Temperaturabsenkung	2.7	K		
Dauer Kondensation Parkett	3	h	35	min
Dauer Kondensation Estrich	15	h	10	min

Die erreichbare Kühlleistung ist bei E-B-8-14 um gut ein Drittel größer als bei E-B-8-18, auch werden bei E-B-8-14 niedrigere Oberflächentemperaturen auf Parkett und Estrich erreicht. Beim direkten Vergleich dieser beiden Varianten (vgl. Abbildung 4-12) sieht man auch, dass in der heißen Sommerwoche bei höherer Vorlauftemperatur (18 °C) die Kühlung viermal aktiv war im Vergleich zu zwei Einschaltzyklen bei 14 °C Vorlauftemperatur.

4 Analyse der Simulationsergebnisse

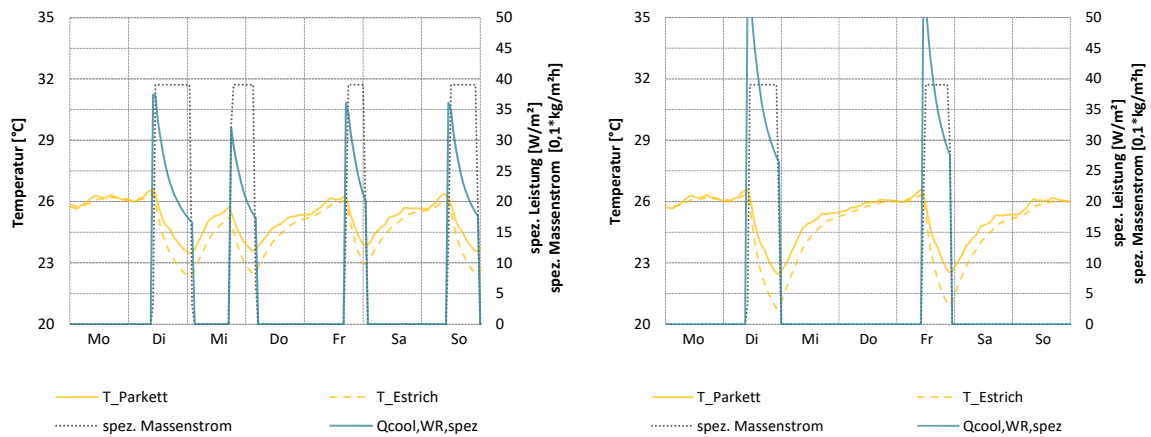


Abbildung 4-12: Vergleich der erreichten Kühlleistung der Varianten mit 18 °C (links) und 14 °C Vorlauftemperatur (rechts)

4.4.2 Auswirkung der Feuchtelasten

Die Höhe der anfallenden Feuchtelasten ist vor allem in Bezug auf die sich ergebende relative Raumluftfeuchte von Bedeutung. Abbildung 4-13 zeigt auf der linken Seite eine Variante mit 8 kg/Tag Feuchteintrag, während im rechten Bild nur 3,8 kg/Tag an Feuchte anfallen. Es fällt auf, dass sich bei der geringeren Feuchtelast ein wesentlich kompakterer „Punktehaufen“ ergibt, wohingegen im linken Bild die Werte wesentlich mehr streuen, auch die Raumluftfeuchtespitzen sind entscheidend höher.

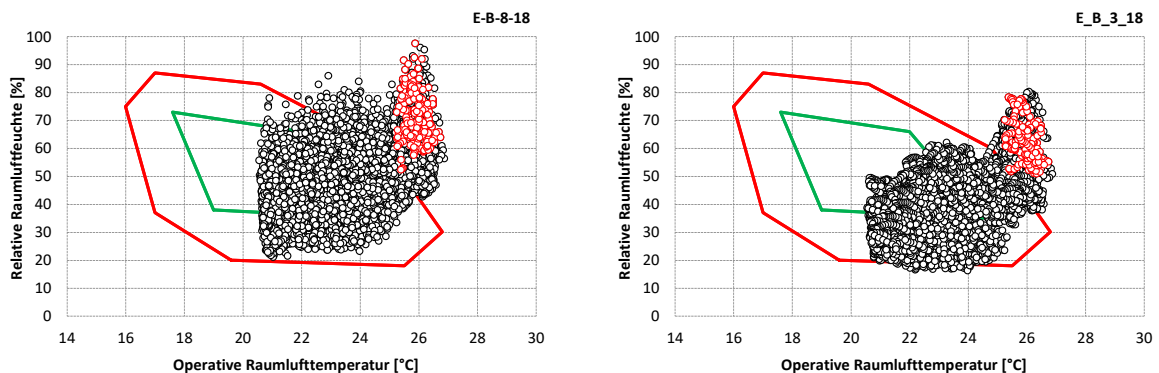


Abbildung 4-13: Auswirkung der eingebrachten Feuchtelasten, links: 8 kg/Tag, rechts: 3.8 kg/Tag

Bezogen auf die Auswertung der Häufigkeit (vgl. Tabelle 4-11) bestätigt sich der optische Eindruck, dass bei den geringeren Feuchtelasten weniger Stunden (1922 h) im unbehaglichen Bereich zu finden sind im Vergleich zu den höheren Feuchtelasten (2433 h).

4 Analyse der Simulationsergebnisse

Tabelle 4-11: Vergleich der Stundenhäufigkeiten je Bereich

E-B-8-18	Jahr		Sommerwoche	
	[h]	[-]	[h]	[-]
angenehm behaglich	3 194	36%	0	0%
ausreichend behaglich	3 133	36%	0	0%
unbehaglich	2 433	28%	168	100%
Summe	8 760	100%	168	100%

E-B-3-18	Jahr		Sommerwoche	
	[h]	[-]	[h]	[-]
angenehm behaglich	2 179	25%	0	0%
ausreichend behaglich	4 659	53%	0	0%
unbehaglich	1 922	22%	168	100%
Summe	8 760	100%	168	100%

4.4.3 Auswirkung des detaillierten Feuchtemodells

Vergleicht man nun die Ergebnisse der unterschiedlichen Feuchtemodelle miteinander, so fällt auf, dass hier die Ergebnisse der Raumluftfeuchte bezogen auf die operative Raumtemperatur Differenzen aufweisen. In Abbildung 4-14 links sieht man eine Variante, in der das detaillierte Feuchtemodell verwendet wird. Verglichen mit der rechten Abbildung (Simple Humidity Model) wirkt auch hier der Punktehaufen etwas kompakter. Dies lässt den Schluss zu, dass durch die Definition der Wände als möglicher Feuchtespeicher diverse Feuchtespitzen abgedefert werden können.

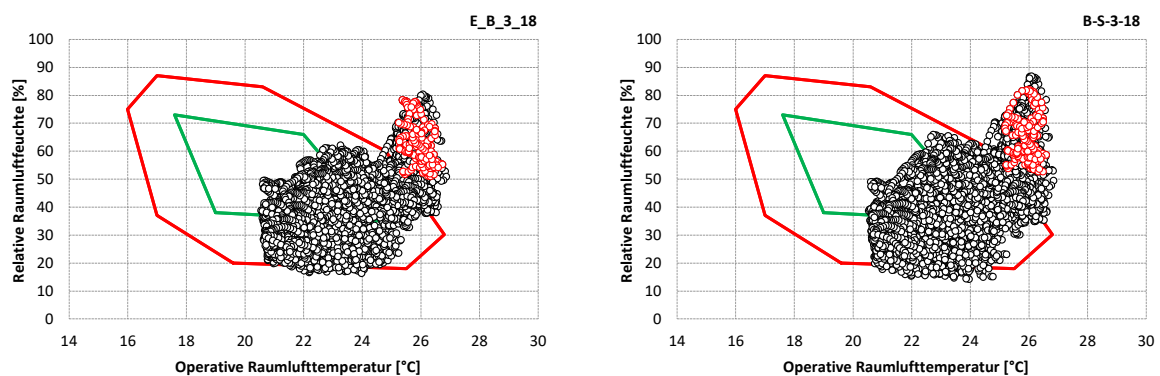


Abbildung 4-14: Auswirkung des verwendeten Feuchtemodells, links: det. Feuchtemodell, rechts: Standardfeuchtemodell

5 MESSKONZEPT ZUR SIMULATIONSVALIDIERUNG

Bisher sind solche Kühlsysteme, wie in Smart City Graz Mitte verbaut, messtechnisch nur in einem sehr kleinen Ausmaß evaluiert worden. Eine fundiertere Kenntnis über das Zusammenwirken von Raumlufttemperatur, Raumluftfeuchte und Oberflächentemperatur des aktivierten Bauteiles ist aber von großer Wichtigkeit für die Beurteilung solcher Systeme und kann simulationstechnisch nur bedingt erlangt werden. Eher gilt es den umgekehrten Weg zu gehen und aus den aufgezeichneten Messdaten Zusammenhänge herzustellen, die in weiterer Folge zur Simulationsmodellverfeinerung verwendet werden. Auch können durch die Messung bzw. in weiterer Folge durch das aktive Handeln der Bewohner Kondensationsschäden praktisch ausgeschlossen werden, denn die speziell für aktivierte Bauteile entwickelten Messsysteme verfügen über eine Benutzeroberfläche, die bei Über- oder Unterschreitung gewisser Grenzwerte Empfehlungen an den Bewohner abgibt.

Im vorliegenden Bauprojekt werden drei Referenzwohnungen ausgesucht und mit einer entsprechenden Messtechnik ausgestattet. Die erfassten Messdaten werden aufbereitet und mit den Simulationsergebnissen verglichen um in weiterer Folge Nachbesserungen an der Simulation durchzuführen. Weiters können bestimmte Messdaten als qualitativ hochwertige Randbedingungen in die Simulation eingebunden werden. Aus simulationstechnischer Sicht sind für eine solide Simulationsvalidierung einige Messgrößen erforderlich, auf die im folgenden Kapitel näher eingegangen wird. Es gilt zu beachten, dass mehrere Referenzwohnungen ausgewählt wurden, um mit Messsensorik ausgestattet zu werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird allerdings nur die in 3.3 bereits erläuterte Wohnung betrachtet und deren messtechnische Ausstattung näher erklärt.

5.1 Simulationsrelevante Messdaten

Zur Überprüfung und Verbesserung der Simulation ist ein Abgleich des verwendeten Klimadatensatzes mit realen Messwerten unerlässlich, da die solare Einstrahlung und die Außenlufttemperatur großen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Die Objektverschattung ist in der Simulation einstrahlungsgeregelt und das 4-Stunden-Mittel der Außenlufttemperatur ist ein Regelparameter der Fußbodenkühlung.

Weiters ist es notwendig zu wissen, wie oft und für wie lange die Fenster geöffnet bzw. gekippt sind, da z.B. im Hochsommer ein gekipptes Fenster die Raumlufttemperatur unnötig in die Höhe treibt und dadurch der Kühlzyklus (Zeitraum zwischen Ein- und Ausschalten der Kühlung) verlängert wird. Ein solches dynamisches Nutzerverhalten ist oft nur schwer zu erfassen, weshalb man sich bei der Erstellung der Simulation meist mit statischen Richtwerten behilft, obwohl diese Faktoren auf Raumklima, Kühlleistung, Kühlzyklen etc. einen wesentlichen Einfluss haben.

5 Messkonzept zur Simulationsvalidierung

Fast selbsterklärend ist das Erfassen der raumklimabestimmenden Faktoren wie Raumlufttemperatur und –feuchte, aber auch die CO₂ Konzentration soll mitaufgezeichnet werden. Dies ist wiederum für ein realistischeres Abbilden des Nutzers essentiell, kann man anhand der CO₂ Konzentration auf Anwesenheit und Lüftungsverhalten rückschließen. Zur besseren Systembeurteilung werden Wärmemenge, Durchfluss und auch die Vor- und Rücklaufemperatur je Wohnung erfasst. Es kann so abgeglichen werden, ob die simulationstechnisch ermittelten Kühlzyklen und auftretenden Kühlleistungen den realen Gegebenheiten entsprechen bzw. ist gegebenenfalls ein Nachbessern der Simulation möglich.

Zur Überwachung des Mikroklimas am bzw. im Boden wird ein Messgerät direkt auf dem Estrich platziert, das von der tragenden Holzschicht abgedeckt wird. Es ist somit für die Bewohner nicht sichtbar und bleibt nach abgelaufener Batterielaufzeit (mehrere Jahre) im Boden verbaut. Dieses Gerät misst Temperatur und Feuchte direkt am Estrich (rohrführende Schicht) und unter dem Parkett. Die Auswertung dieser Messdaten verspricht einen empirisch gewonnenen Zusammenhang zwischen Raum- und Bodenklima, der in dieser Form noch nicht vorhanden ist, aber einen wesentlichen Vorteil für die Entwicklung baulich ähnlicher Projekte darstellt. In Tabelle 5-1 sind die unterschiedlichen Messstellen und deren Messgrößen aufgelistet, wobei eine konzeptuelle Gliederung angedacht ist.

Das Außenklima muss nicht für jede Wohnung extra erfasst werden, hier genügt eine „Wetterstation“ für das gesamte Vorhaben. Um die Fensteröffnung feststellen zu können ist es jedoch notwendig, jedes der Fenster mit Fensterkontakten auszustatten. Die Aufzeichnung der raumklimarelevanten Daten erfolgt ebenso in jedem Raum der ausgewählten Referenzwohnungen, also auch im Badezimmer, das von der Konditionierung im Sommer ausgeschlossen ist. Je Referenzwohnung wird einmal der Massenstrom, sowie Vor- und Rücklaufemperatur der Fußbodenheizung/-kühlung erfasst und auch die Wärmemenge wird wohnungsweise aufgezeichnet. In den konditionierten Räumen (Vorraum, Wohnraum und Schlafzimmer) soll jeweils ein Messgerät direkt in den Boden fix eingebaut werden, dessen Daten via Bluetooth ausgelesen werden. Zur besseren Übersicht sind die zusammengefassten Messstellen farblich codiert und können so bei der Darstellung der Verortung der Messpunkte leichter erkannt werden.

5 Messkonzept zur Simulationsvalidierung

Tabelle 5-1: Auflistung der Messgrößen

Farbcode	Messstelle	Zu messende Größen
●	Außenbereich	Strahlung I Temperatur- T_{amb} , Feuchte rH_{amb} der Außenluft
●	Fensterrahmen	Stellung des Fensters
●	Raumweise	Lufttemperatur T_R rel. Luftfeuchte rH_R CO2 Konzentration
●	Wohnungsweise bei Übergabestation	Wärmemenge Q Durchfluss \dot{V} Vorlauf T_{VL} - und Rücklauf-temperatur T_{RL}
●	Je Heiz- bzw. Kühlkreis	Temperatur T_P , rel. Luftfeuchte rH_P unter oberer Holzschicht Temperatur T_E , rel. Luftfeuchte rH_E direkt an Estrichoberfläche

Die Verortung der verwendeten Messtechnik ist in Abbildung 5-1 zu entnehmen, wobei der in Tabelle 5-1 angeführte Farbcode verwendet wird.

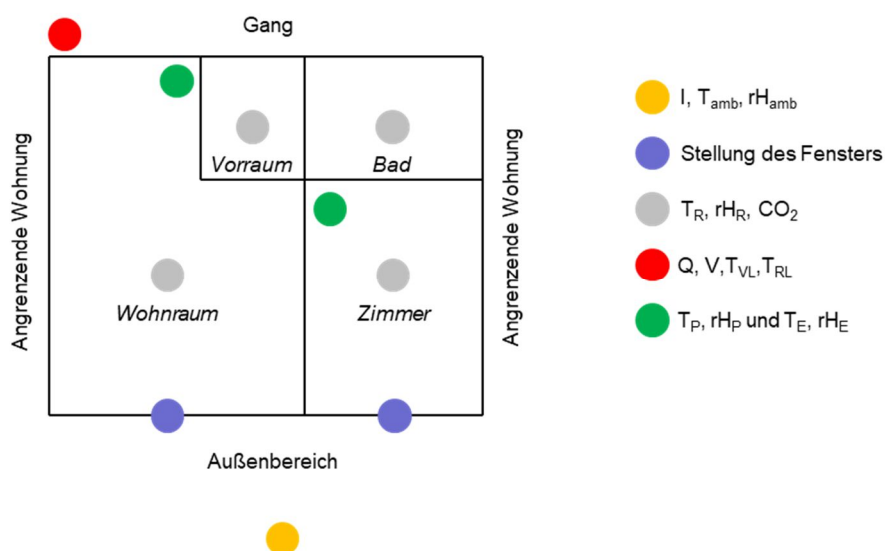


Abbildung 5-1: Positionierung der Messensoren am Beispiel der Referenzwohnung

5 Messkonzept zur Simulationsvalidierung

Im Außenbereich (gelb) werden die klimatischen Bedingungen erfasst, wobei einmalig für das gesamte Areal Werte für Globalstrahlung, Außenlufttemperatur und -feuchte (= 3 Werte) aufgezeichnet werden. Je Fenster (lila) gibt es zwei Sensoren. Grau gekennzeichnet sind die raumweisen Messpunkte, an denen, wie oben bereits erläutert, Raumlufttemperatur und relative Luftfeuchte sowie die CO₂ Konzentration (= 3 Werte) aufgezeichnet werden. Sie sind möglichst in Raummitte positioniert, um ein möglichst aussagekräftiges Messergebnis zu erzielen und Einflüsse wie Einstrahlung durch Fenster o.ä. zu minimieren. In Wohnraum und Schlafzimmer erfolgt grün markiert die Erfassung der fürs Bodenklima signifikanten Daten, jeweils Temperatur und Feuchte an der Estrichoberfläche bzw. unter der tragenden Holzschicht des verlegten Parketts (= 4 Werte). Rot dargestellt ist die je Wohnung durchgeführte Messung an der Wohnungsübergabestation des Konditionierungssystems, an dem der Durchfluss, die abgegebene bzw. aufgenommene Wärmemenge und die Temperatur des Vorlaufs und Rücklaufs (= 4 Werte) festgehalten werden.

6 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Die der durchgeführten Simulationsstudie zugrundeliegenden Fragestellungen (vgl. Kapitel 1.2) waren im Wesentlichen einerseits die Ermittlung der in Referenzobjekt vorhandenen Kühllast und ob diese mit dem eingebauten Fußbodenkühlsystem abgedeckt werden kann und andererseits welche Temperaturabsenkungen (im Mittel bzw. maximal) durch die Fußbodenkühlung im Vergleich mit einer ungekühlten Variante erzielt werden können. Außerdem war es wichtig herauszufinden, inwieweit es zu Kondensation an der Fußbodenoberfläche bzw. an der Estrichoberfläche kommt und was anhand der Simulationsergebnisse bzw. der gewählten Simulationsumgebung daraus abgeleitet werden kann. Ein weiterer wichtiger Aspekt war es den Einfluss der Fußbodenkühlung auf die thermische Behaglichkeit zu bewerten, wobei in diesem Zusammenhang ein Vergleich der gängigen Normen (EN ISO 7730 (2006), DIN 15251 (2007) und EN 16798-1(2019)) durchgeführt wurde und außerdem auch die relative Raumluftheuchte in Bezug auf Behaglichkeitskriterien ausgewertet wurde.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zur Bearbeitung der oben formulierten Fragestellungen eine thermische Gebäudesimulation in TRNSYS (2017) erstellt, bei der sowohl das einfache Feuchtemodell als auch das detaillierte verwendet wurden (vgl. Abschnitt 2.4.2).

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass mit dem vorhandenen Kühlungssystem die anfallende Kühllast in der Höhe von 220 kWh/a in jedem hier untersuchten Szenario abgeführt werden und eine, wie in Kapitel 4.2 angeführt, mittlere Absenkung der operativen Raumtemperatur von 1,4 bis 1,7 K erreicht werden kann. In Bezug auf Kondensationsauftritte ist zumindest eine Aussage über die Gesamtdauer bzw. den Zeitpunkt des Auftritts und die dabei vorherrschenden Oberflächentemperaturen (Parkett, Estrich) möglich. Es gilt aber zu beachten, dass ein Feuchtetransport im Fußbodenaufbau mit dem verwendeten Simulationstool nicht berücksichtigt werden konnte. Die Auswertung bezogen auf die thermische Behaglichkeit zeigen interessante Ergebnisse, vor allem im Vergleich der einzelnen Ansätze. So ist sichtbar, dass die in der EN ISO 7730 (2006) gewählten konstanten Grenzwerte der Kategorien A, B und C ein Szenario weniger behaglich erscheinen lassen, als eine Auswertung nach DIN 15251 (2007) oder EN 16798-1 (2019). Außerdem ist ein Mitberücksichtigen der relativen Raumluftheuchten in Bezug auf die operativen Raumlufthtemperaturen und die Einhaltung der entsprechenden Grenzen ein zusätzlicher Aspekt, durch den sich weitere nützliche Informationen über den Wohnraum gewinnen lassen.

In weiterfolgenden Untersuchungen ist eine Sensitivitätsanalyse in Hinblick auf das detaillierte Feuchtemodell ratsam da es für die Ermittlung der notwendigen Parameter mehrere Ansätze gibt und in der vorliegenden Arbeit nur einer angewandt wurde. Ein Weiterverfolgen bzw. eine

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

nähere Untersuchung der taupunktgeführten Vorlauftemperatur in Hinblick auf die Regelung erscheint ebenso vielversprechend wie das Optimieren der Lüftung, welche in den gegenständlichen Untersuchungen als konstant angenommen wurde. Wenn ein erstes Auswerten der Messdaten erfolgen kann ist das Generieren eines realistischeren Nutzerverhaltens möglich und eine Implementierung in die vorhandene Simulation kann sehr wahrscheinlich zu besseren Ergebnissen führen. Eine weitere Möglichkeit wäre der Versuch mit Hilfe einer entsprechenden Rechenumgebung (WUFI, Delphin o.ä.) einen empirischen Zusammenhang zwischen dem Raumzustand (Temperatur, relative Luftfeuchte) und dem Zustand zwischen Parkett und Estrich herzustellen, der in weiterer Folge in TRNSYS verwendet werden kann. Ein Vergleich mit dem hier gewählten Worst Case Ansatz würde zeigen, wie realistisch dieser tatsächlich ist.

LITERATURVERZEICHNIS

- Bundesverband Flächenheizung und -kühlung e.V.** (2015): „Bauteilintegrierte Systeme der Flächenheizung und Flächenkühlung – Aufbau und Funktionsweise“. Richtlinie 11. Hagen.
- Bundesverband Flächenheizung und -kühlung e.V.** (2019): „Kühlen und Heizen mit Deckensystemen: Grundlagen und Möglichkeiten“. Richtlinie 15. Hagen.
- Dentel, Arno und Dietrich, Udo** (2006): „Thermische Behaglichkeit - Komfort in Gebäuden“. Bericht. Hafencity Universität. Hamburg
- DIN 15251** (2007): „Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik“. Norm. Ausgabe 2007-09-01. Österreichisches Normungsinstitut. Wien.
- EN 16798-1** (2019): „Energy performance of buildings – Ventilation for buildings“. Norm. Ausgabe 2019-11-01. Österreichisches Normungsinstitut. Wien.
- EN ISO 7730** (2006): „Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen Behaglichkeit.“ Norm. Ausgabe 2006-05-01. Österreichisches Normungsinstitut. Wien.
- Fenner, Daniel; Mücke, Hans-Guido und Scherer, Daniel** (2015): „Innerstädtische Lufttemperatur als Indikator gesundheitlicher Belastungen in Großstädten am Beispiel Berlins“. Studie. Technische Universität Berlin. Berlin.
- Frank, Wolfgang** (1975): „Raumklima und thermische Behaglichkeit“. Bericht. Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP. Holzkirchen.
- Glück, Bernd** (1999): „Thermische Bauteilaktivierung – Nutzen von Umweltenergie und Kappillarrohren“. Buch. Verlag Müller. Heidelberg.
- Hartmann, Frank** (2017): „Flächenkühlung und Kältebereitstellung“. Artikel. Sanitär-Heizung-Klima. S.21 ff.
- Hiller, Marion und Schulz, Monika** (2015): „Das dynamische Gebäude- und Anlagensimulationsprogramm TRNSYS“. Buchbeitrag. Verlag Ernst & Sohn GmbH. Hannover.
- Hörner, Bernd und Casties, Manfred** (2016): „Handbuch der Klimatechnik Band 1: Grundlagen“. Buch. VDE Verlag. Berlin.
- Koschenz, Markus und Lehmann, Beat** (2000): „Thermoaktive Bauteilsysteme tabs“. Buch. EMPA Energiesysteme/Haustechnik. Dübendorf.
- Lengsfeld, Kristin und Holm, Andreas** (2007): „Entwicklung und Validierung einer hygrothermischen Raumklima-Simulationssoftware WUFI-Plus“. Artikel. Bauphysik 29, Heft 3. Ernst & Sohn Verlag. Berlin.

- SIA 2024** (2015): „Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik“. Merkblatt. Schweizer Ingenieur- und Architektenverein. Zürich.
- Olesen, Bjarne W.** (2003): „Flächenkühlung mit Absorptionswärmepumpen und Solarkollektoren“. Artikel. KI Luft- und Kältetechnik. S. 212-219
- Pitt, Walter** (2019): „Holz auf gekühlten Fußbodenkonstruktionen: 10 Gebote“. Artikel. boden wand decke.
- Pollhammer, Christian** (2016): „Hitzeschutzplan Steiermark“. Bericht. Amt der Steiermärkischen Landesregierung. Graz.
- Präsidialabteilung Magistrat Graz** (2015): „Bevölkerungsprognose 2015-2034“. Bericht. Referat für Statistik. Graz.
- Rieberer, Rene** (2016): „Heizungs- Lüftungs-, Klimatechnik Skriptum“. VO-Skript. TU Graz. Graz.
- Schild, Kai und Willems, Wolfgang** (2011): „Wärmeschutz- Grundlagen-Berechnung-Bewertung“. Buch. Verlag Vieweg + Teubner. Wiesbaden.
- Schlaisich, Matthias** (2013): „Bestimmung der Heiz- und Kühlgradtage im Alpenraum“. Diplomarbeit. Universität Wien. Fakultät für Geowissenschaften, Geographie und Astronomie.
- Sedlbauer, Klaus und Krus, Martin** (2003): „Schimmelpilze aus der Sicht der Bauphysik: Wachstumsvoraussetzungen, Ursachen und Vermeidung“. Beitrag. Verlag: Vieweg + Teubner. Wiesbaden.
- Seidel, Paul; Gritzki, Ralf; Haupt, Jens und Rösler, Markus** (2013): „Sommerliche Raumkühlung im Wohnbau mittels kombinierter Heiz- und Kühlsysteme und gleitender nicht normierter Raumtemperaturen“. Bericht. Technische Universität Dresden. Dresden.
- Tang, Haida, Liu, Xiao-Hua und Jian, Yi** (2016): „Theoretical and experimental study of condensation rates on radiant cooling surfaces in humid air“. Artikel. Elsevier-Building and Environment.
- Timm, Harry, Allmendinger, Thomas und Strehle, Norbert** (2019): „Estriche, Parkett und Bodenbeläge – Arbeitshilfen für die Planung, Ausführung und Beurteilung“. Buch. Verlag Springer Vieweg. Koblenz.
- Willems, Wolfgang, Schild, Kai und Dinter, Simone** (2006): „Handbuch Bauphysik Teil 1“. Buch. Verlag Vieweg & Sohn Verlag. Wiesbaden.
- Wimmer, Andreas** (2004): „Thermoaktive Bauteile – Ein neuer simulationstechnischer Berechnungsansatz“. Dissertation. Universität Kassel. Fakultät für Architektur. Kassel.
- Winzek, B.** (1996): „Transys 14.1, ein neues Rechenmodell“. Workshopbeitrag. 3. WTA Workshop. ETH Zürich. Institut für Baustoffe. Zürich.

Zarella, Angelo, De Carli, Michele und Peretti, Clara (2014): „Radiant floor cooling coupled with dehumidification systems in residential buildings: A simulation based analysis“. Artikel. Elsevier-Energy Conversion and Management.

Zhang, Xiaobo, Zillig, Wolfgang, Künzel, Hartwig, Zhang, Xu, Mitterer, Christoph (2015): „Evaluation of moisture sorption models and modified Mualem model for prediction of desorption isotherm for wood materials“. Artikel. Elsevier-Building and Environment.

Zillig, Wolfgang (2009): “Moisture transport in wood using a multiscale approach“. Dissertation. Katholieke Universiteit Leuven. Faculteit Ingenieurswetenschappen. Leuven.

Zürcher, Christoph und Frank, Thomas (2018): „Bauphysik Bau und Energie“. Buch. Verlag ETH Zürich. Zürich.

BEKA - Klima - Komfort (2020): <https://www.beka-klima.de/heizen-kuehlen/kapillarrohrtechnik/> (23.11.2020)

energieexperten.org (2020): <https://www.energie-experten.org/energie-sparen/heizkosten-sparen/richtig-lueften/raumluftfeuchtigkeit> (23.11.2020)

Gobiert, Andreas et. al. (2012): <http://www.technik.steiermark.at/cms/beitrag/11678675/67473781/> (15.2.2020)

Rech, Heiko (2016): <http://www.holzwerken.net/Blog/Heiko-Rech/Stehend-oder-liegend> (15.2.2020)

Stadtbaudirektion Graz (2020): <http://www.smartcitygraz.at/> (4.2.2020)

Straßenvermessungsamt Stadt Graz (2020): <https://geodaten.graz.at/WebOffice/synserver?project=stadtklima&client=core> (23.11.2020)

Vallant, Oliver (2020): “Energiekonzept der Smart City Mitte“. <https://www.mysmartcitygraz.at/projekt/mitte/> (5.2.2020)

Verein Smart City Graz Service und Marketing (2018): https://www.mysmartcitygraz.at/wp-content/uploads/2019/07/SmartCityMitte_cam07_center-living-abend-768x432.png (14.2.2020)

Weitzer Parkett (2012): “Merkblatt – MB010“. <https://www.weitzer-parkett.com/service/download/> (3.2.2020)

Sketch Up (2017). Version 18.1.16975. Sunnyvale-California.

TRNSYS (2017). Version 18.1. Solar Energy Lab. University of Wisconsin.

Meteonorm (2012). Version 7. Meteotest AG. Bern.

ANHANG

Die gesammelten Simulationsergebnisse der im Kapitel 4 erwähnten Varianten werden hier im Anhang dargestellt, die Ergebnisse nicht explizit erwähnter Varianten werden nicht angeführt.

A1. Auswertung Variante B-S-3-kk

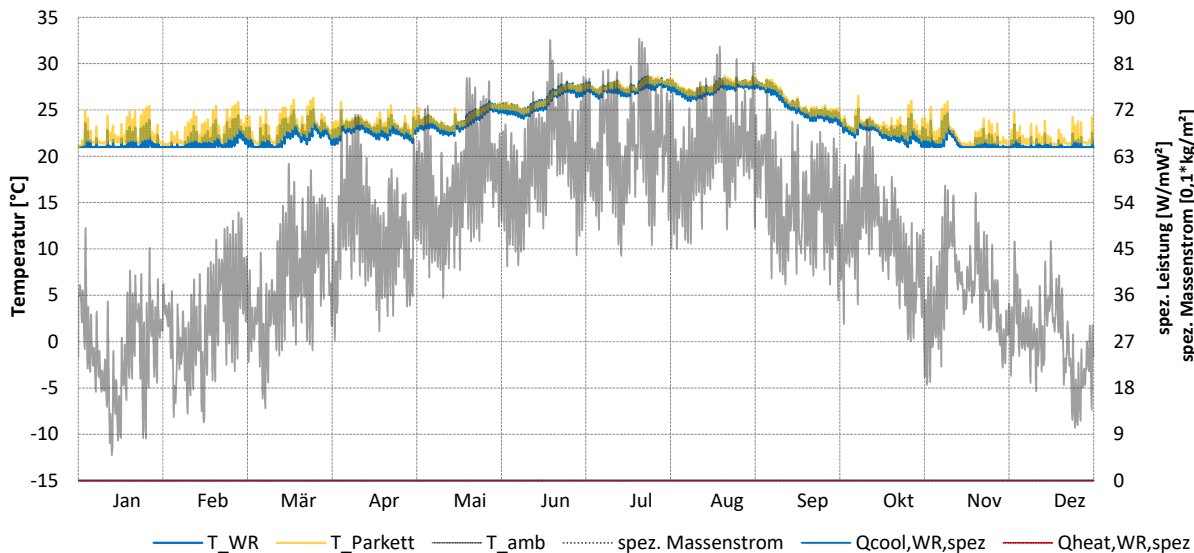
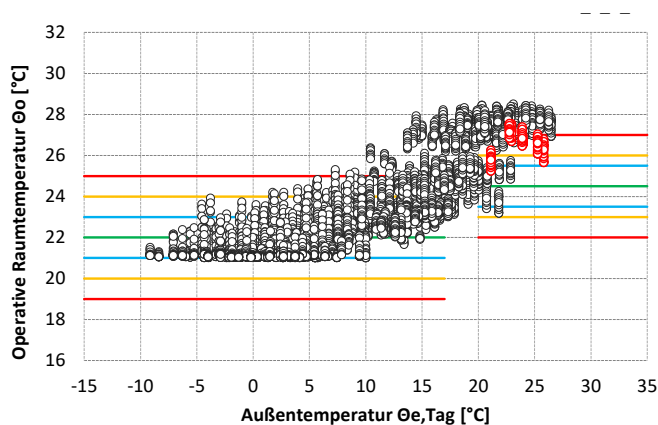


Abbildung A 1: Jahresverlauf Variante B-S-3-kk



B_S_3_kk	$\Theta_{e, \text{Tag}} > 20 \text{ } ^\circ\text{C}$		Sommerwoche	
	[hr]	[-]	[hr]	[-]
> Obergrenze	966	72%	44	26%
Kat. C, oben	208	15%	98	58%
Kat. B, oben	28	2%	20	12%
Kat. A, oben	89	7%	6	4%
Kat. A, unten	42	3%	0	
Kat. B, unten	11	1%	0	
Kat. C, unten	0		0	
< Untergrenze	0		0	
Summe:	1344	100%	168	100%

Abbildung A 2: EN ISO 7730 (2006) Variante B-S-3-kk

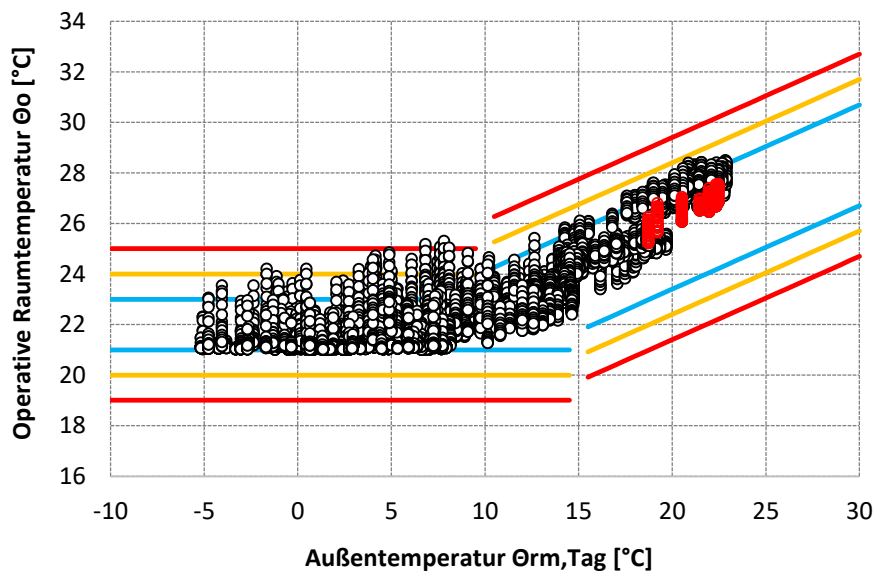
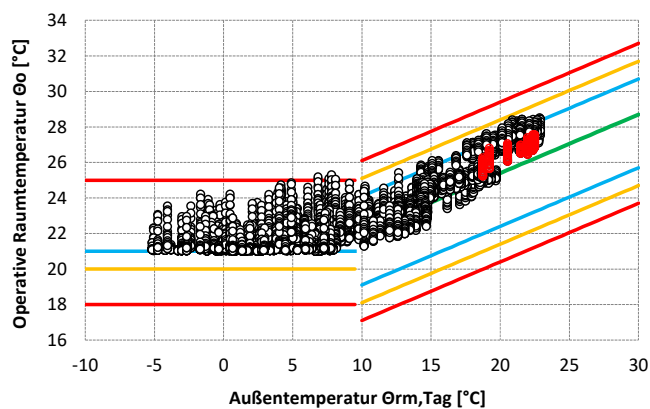
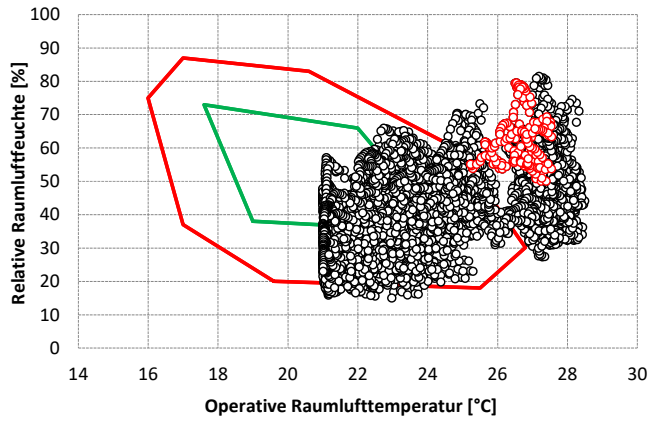


Abbildung A 3: DIN 15251 (2007) Variante B-S-3-kK



B_S_3_kK	$\Theta_{m,Tag} > 10\text{ °C}$		Sommerwoche	
	[hr]	[-]	[hr]	[-]
> Obergrenze	0		0	
Kat. C, oben	0		0	
Kat. B, oben	516	11%	0	
Kat. A, oben	3 240	69%	168	100%
Kat. A, unten	972	21%	0	
Kat. B, unten	0		0	
Kat. C, unten	0		0	
< Untergrenze	0		0	
	4728		168	

Abbildung A 4: Darstellung EN 16798-1 (2019) Variante B-S-3-kK



B_S_3_kk	Jahr		Sommerwoche	
	[hr]	[-]	[hr]	[-]
angenehm behaglich	2 130	24%	0	0%
ausreichend behaglich	5 994	68%	74	44%
unbehaglich	636	7%	94	56%
Summe	8 760	100%	168	100%

Abbildung A 5: Darstellung Behaglichkeit in Bezug auf Raumluftfeuchte Variante B-S-3-kk

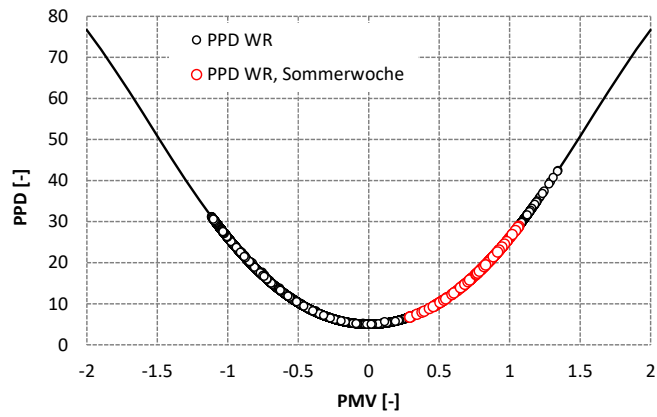


Abbildung A 6: Darstellung des PPD-Index in Abhängigkeit des PMV-Index Variante B-S-3-kk

A2. Auswertung Variante B-S-3-18

Tabelle A 1: Eckdaten Fußbodenkühlung Variante B-S-3-18

abgeführte Wärmemenge	274	kWh/a		
abgeführte Wärmemenge, spez.	5.69	kWh/(m ² a)		
aktive Kühlung	214	h		
mittlere Temperaturabsenkung	1.6	K		
maximale Temperaturabsenkung	2.4	K		
Kondensation Parkett	0	h	0	min

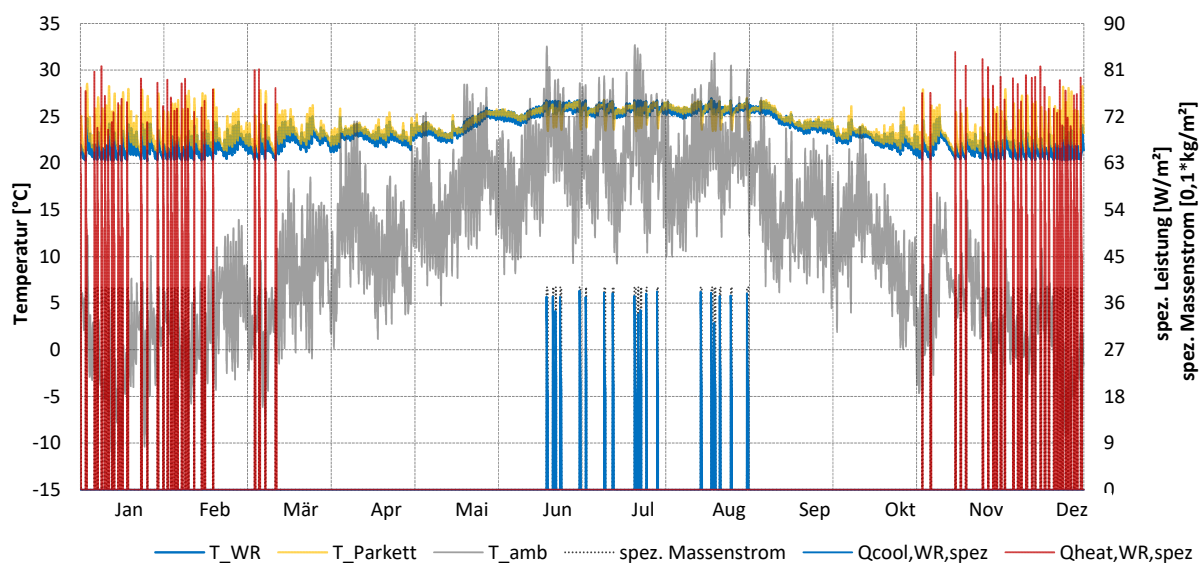


Abbildung A 7: Darstellung Jahresverlauf Variante B-S-3-18

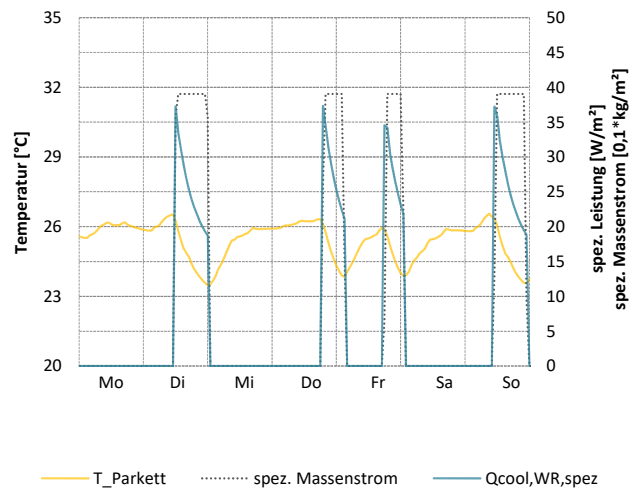


Abbildung A 8: Darstellung Sommerwoche Kühlung Variante B-S-3-18

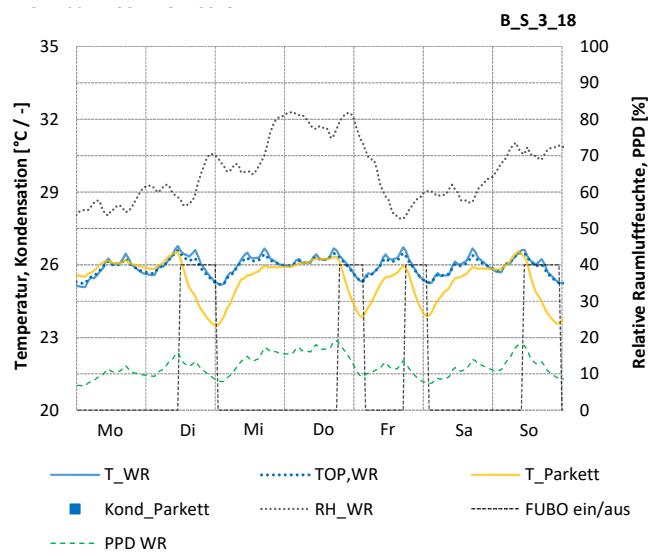
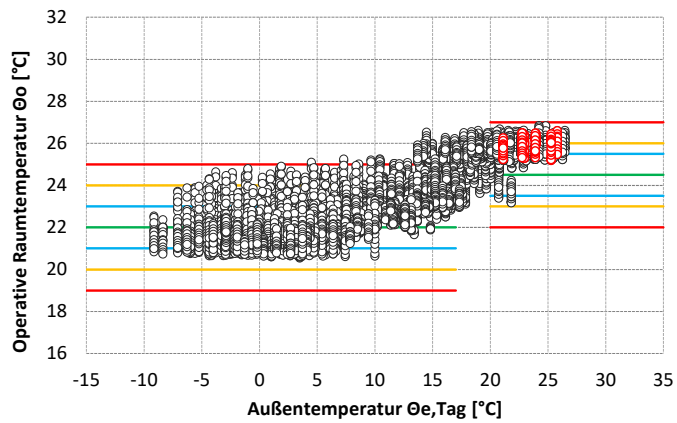


Abbildung A 9: Darstellung Sommerwoche Fußboden und Raum Variante B-S-3-18



B_S_3_18	$\Theta_{e, \text{Tag}} > 20 \text{ }^\circ\text{C}$		Sommerwoche	
	[hr]	[-]	[hr]	[-]
> Obergrenze	0		0	
Kat. C, oben	523	39%	81	48%
Kat. B, oben	525	39%	62	37%
Kat. A, oben	243	18%	25	15%
Kat. A, unten	42	3%	0	
Kat. B, unten	11	1%	0	
Kat. C, unten	0		0	
< Untergrenze	0		0	
Summe:	1344	100%	168	100%

Abbildung A 10: EN ISO 7730 (2006) Variante B-S-3-18

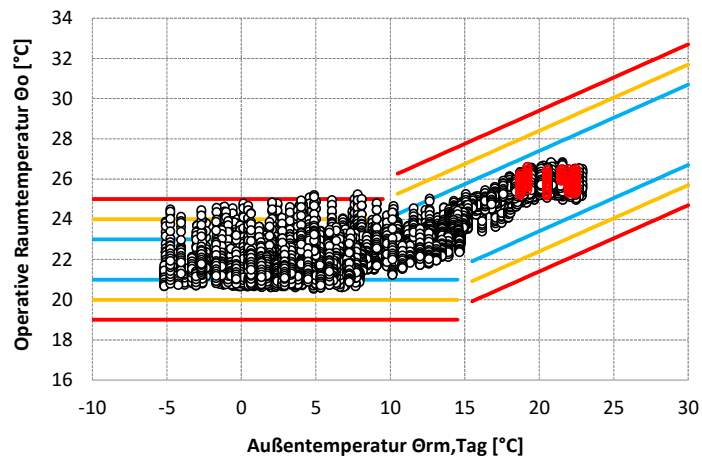
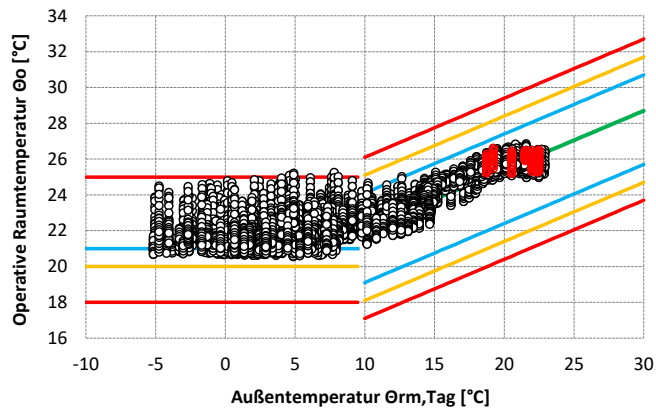
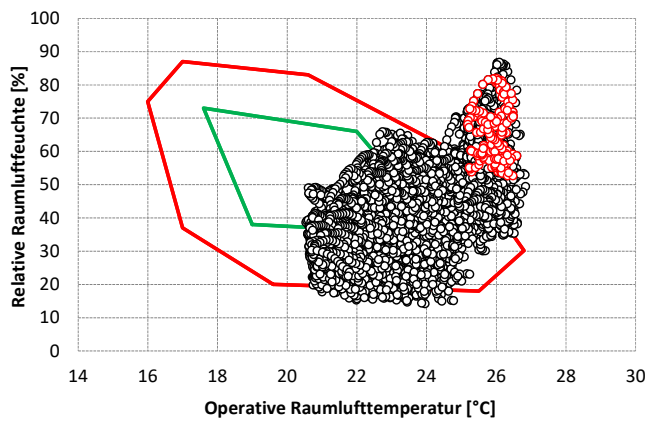


Abbildung A 11: DIN 15251 (2007) Variante B-S-3-18



B_S_3_18	$\Theta_{rm, Tag} > 10\text{ °C}$		Sommerwoche	
	[hr]	[-]	[hr]	[-]
> Obergrenze	0		0	
Kat. C, oben	0		0	
Kat. B, oben	1	0%	0	
Kat. A, oben	2 936	62%	108	64%
Kat. A, unten	1 791	38%	60	36%
Kat. B, unten	0		0	
Kat. C, unten	0		0	
< Untergrenze	0		0	
	4728		168	

Abbildung A 12: Darstellung EN 16798-1 (2019) Variante B-S-3-18



B_S_3_18	Jahr		Sommerwoche	
	[hr]	[-]	[hr]	[-]
angenehm behaglich	2 161	25%	0	0%
ausreichend behaglich	4 635	53%	0	0%
unbehaglich	1 964	22%	168	100%
Summe	8 760	100%	168	100%

Abbildung A 13: Darstellung Behaglichkeit in Bezug auf Raumluftfeuchte Variante B-S-3-18

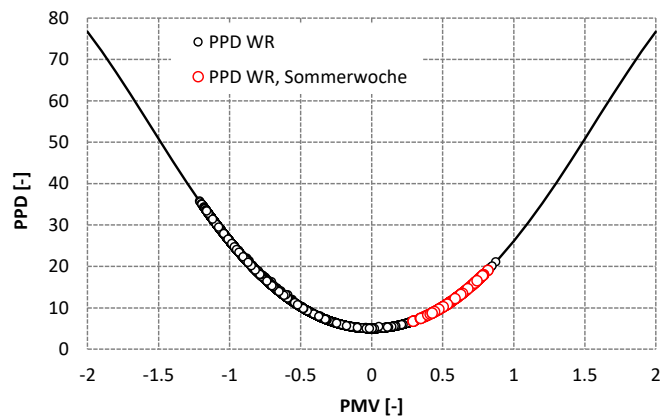


Abbildung A 14: Darstellung des PPD-Index in Abhängigkeit des PMV-Index Variante B-S-3-18

A3. Auswertung Variante B-S-8-18

Tabelle A 2: Eckdaten Fußbodenkühlung Variante B-S-8-18

abgeführte Wärmemenge	274	kWh/a		
abgeführte Wärmemenge, spez.	5.69	kWh/(m ² a)		
aktive Kühlung	214	h		
mittlere Temperaturabsenkung	1.6	K		
maximale Temperaturabsenkung	2.4	K		
Kondensation Parkett	11	h	5	min
Kondensation Estrich	-	h	-	min

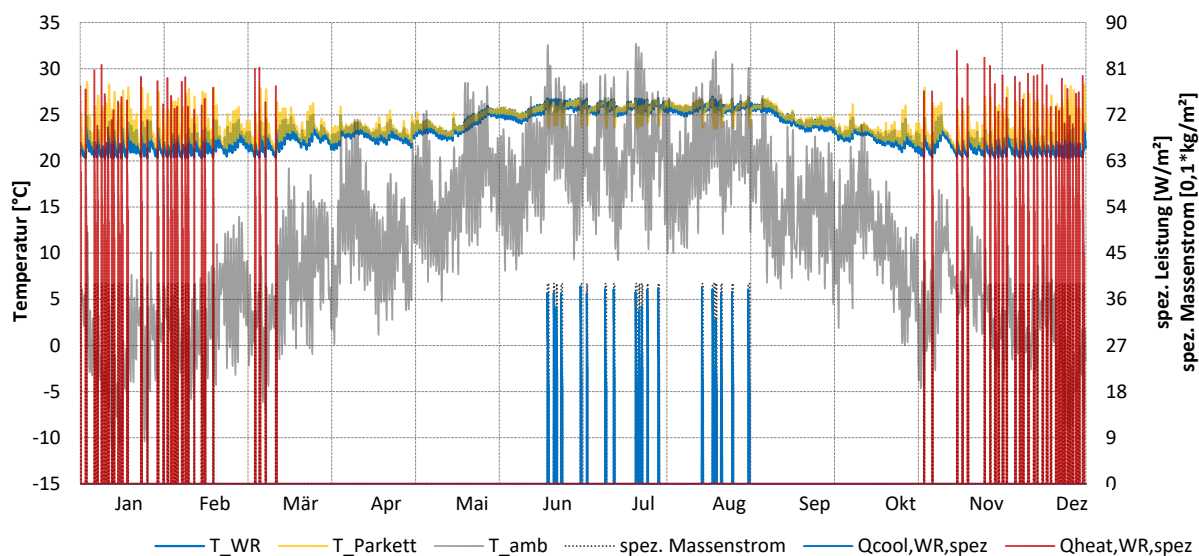


Abbildung A 15: Darstellung Jahresverlauf Variante B-S-8-18

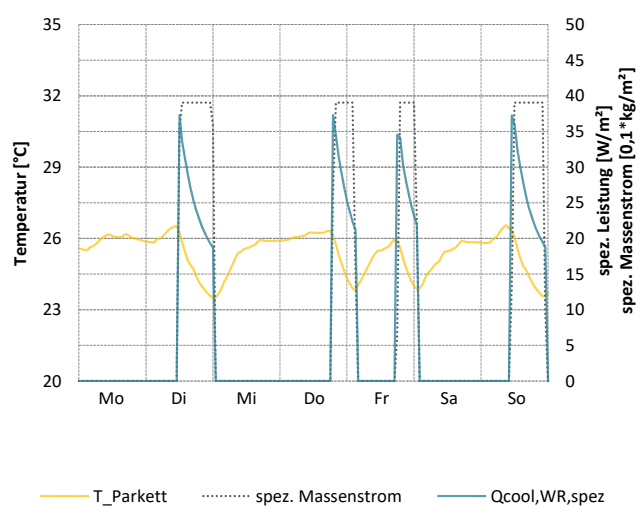


Abbildung A 16: Darstellung Sommerwoche Kühlung Variante B-S-8-18

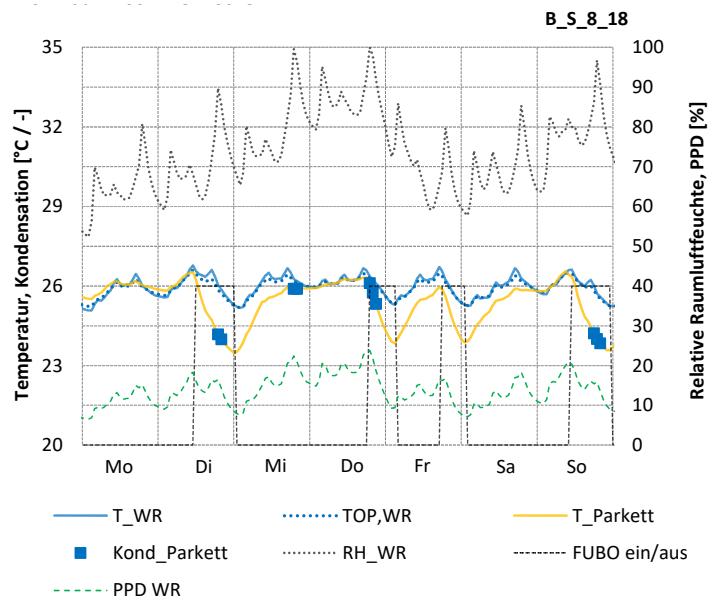
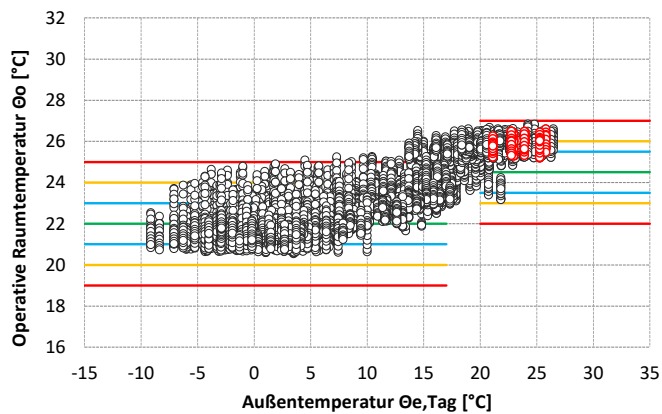


Abbildung A 17: Darstellung Sommerwoche Fußboden und Raum Variante B-S-8-18



B_S_8_18	$\Theta_{e, \text{Tag}} > 20 \text{ }^\circ\text{C}$		Sommerwoche	
	[hr]	[-]	[hr]	[-]
> Obergrenze	0		0	
Kat. C, oben	523	39%	81	48%
Kat. B, oben	525	39%	62	37%
Kat. A, oben	243	18%	25	15%
Kat. A, unten	42	3%	0	
Kat. B, unten	11	1%	0	
Kat. C, unten	0		0	
< Untergrenze	0		0	
Summe:	1344	100%	168	100%

Abbildung A 18: EN ISO 7730 (2006) Variante B-S-8-18

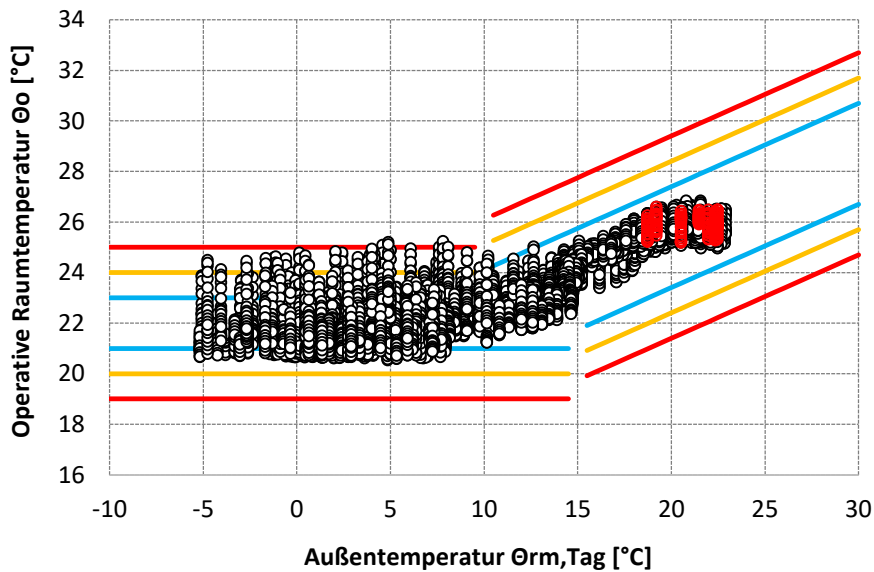
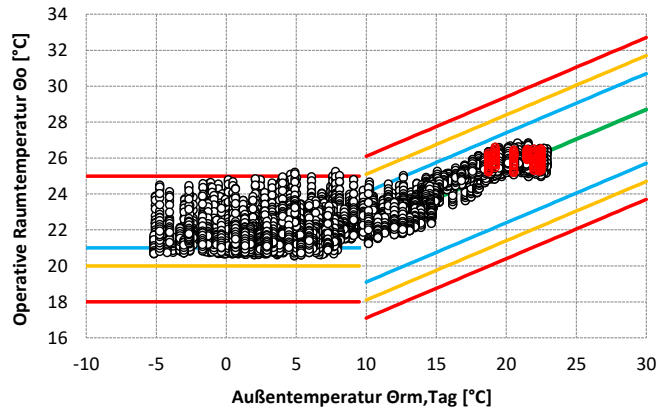
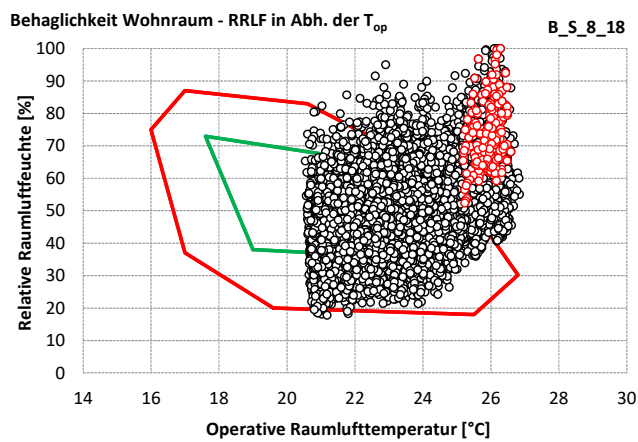


Abbildung A 19: DIN 15251 (2007) Variante B-S-8-18



B_S_8_18	$\Theta_{rm,Tag} > 10\text{ °C}$		Sommerwoche	
	[hr]	[-]	[hr]	[-]
> Obergrenze	0		0	
Kat. C, oben	0		0	
Kat. B, oben	1	0%	0	
Kat. A, oben	2 936	62%	108	64%
Kat. A, unten	1 791	38%	60	36%
Kat. B, unten	0		0	
Kat. C, unten	0		0	
< Untergrenze	0		0	
	4728		168	

Abbildung A 20: Darstellung EN 16798-1 (2019) Variante B-S-8-18



B_S_8_18	Jahr		Sommerwoche	
	[hr]	[-]	[hr]	[-]
angenehm behaglich	3 007	34%	0	0%
ausreichend behaglich	3 213	37%	2	1%
unbehaglich	2 540	29%	166	99%
Summe	8 760	100%	168	100%

Abbildung A 21: Darstellung Behaglichkeit in Bezug auf Raumluftfeuchte Variante B-S-8-18

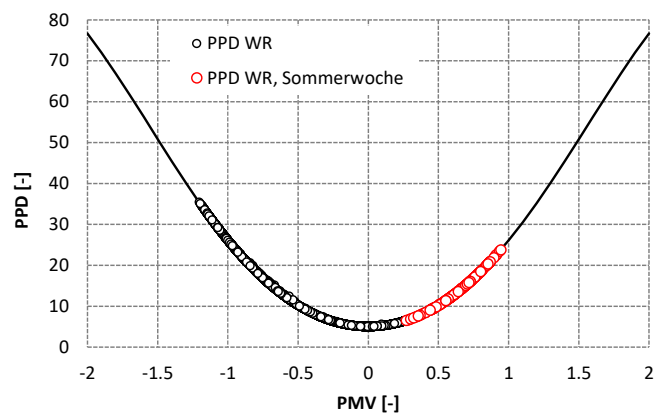


Abbildung A 22: Darstellung des PPD-Index in Abhängigkeit des PMV-Index Variante B-S-8-18

A4. Auswertung Variante B-B-3-18

Tabelle A 3: Eckdaten Fußbodenkühlung Variante B-B-3-18

abgeführte Wärmemenge	274	kWh/a		
abgeführte Wärmemenge, spez.	5.69	kWh/(m ² a)		
aktive Kühlung	214	h		
mittlere Temperaturabsenkung	1.6	K		
maximale Temperaturabsenkung	2.4	K		
Kondensation Parkett	0	h	0	min
Kondensation Estrich	-	h	-	min

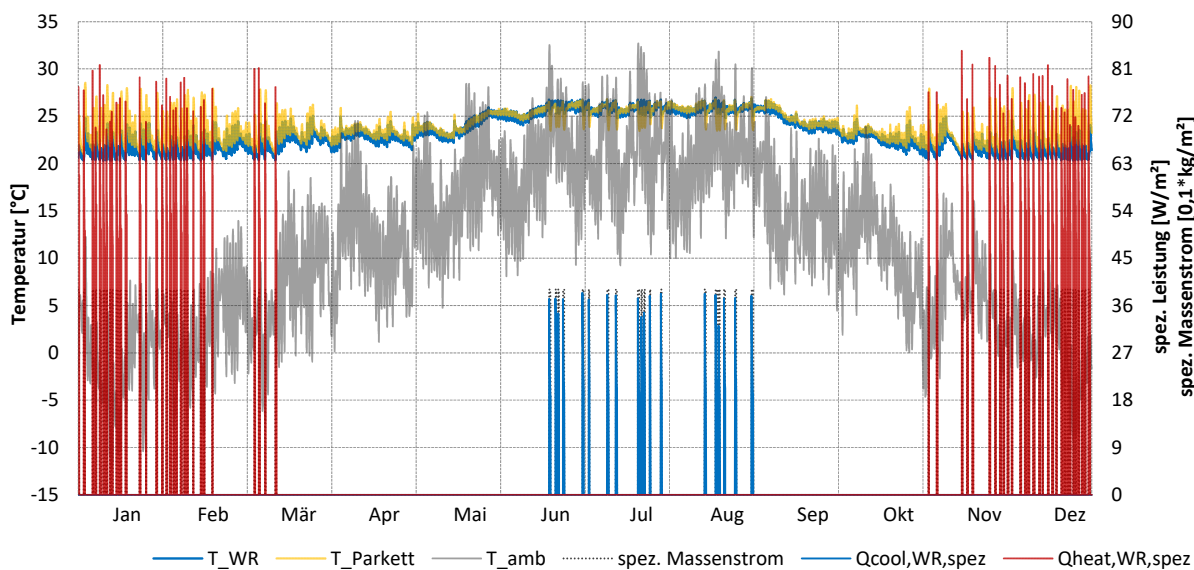


Abbildung A 23: Darstellung Jahresverlauf Variante B-B-3-18

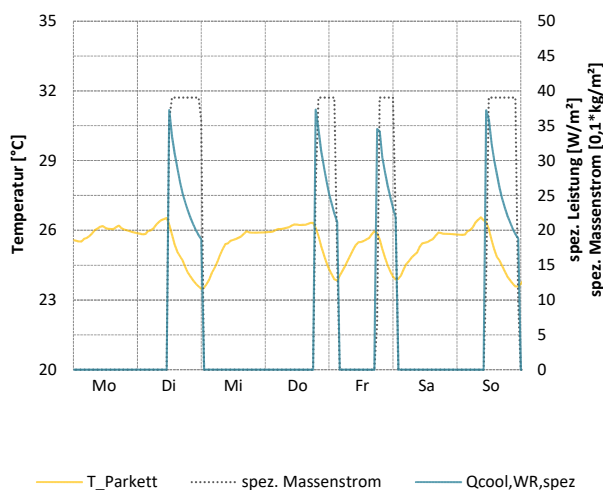


Abbildung A 24: Darstellung Sommerwoche Kühlung Variante B-B-3-18

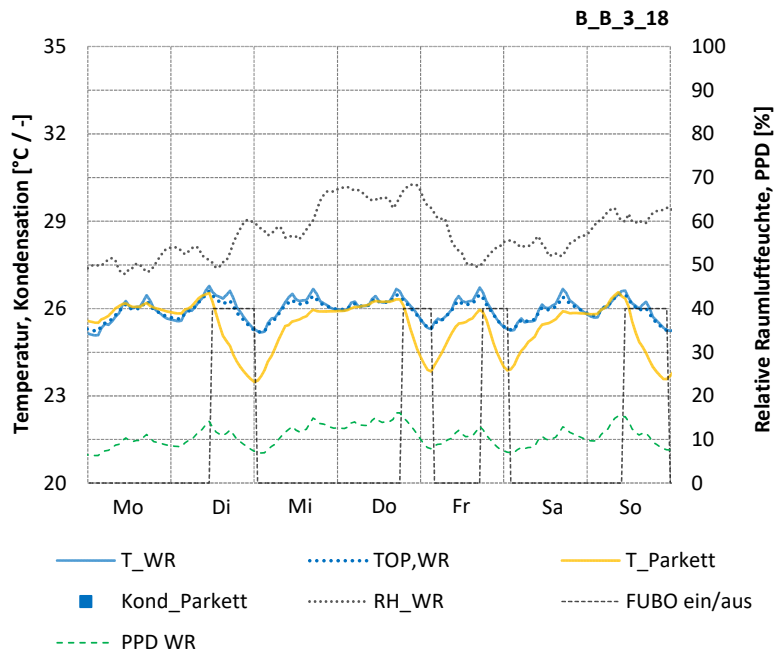
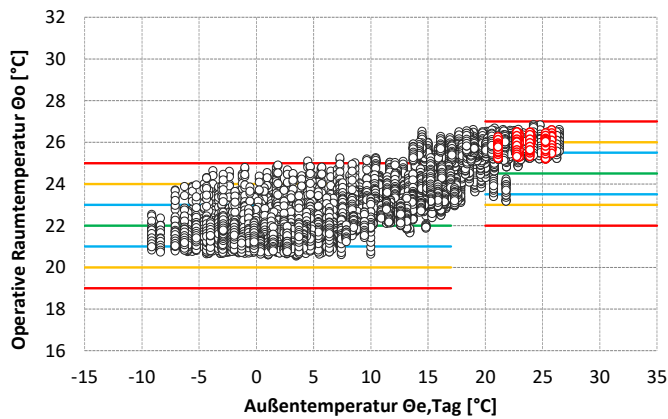


Abbildung A 25: Darstellung Sommerwoche Fußboden und Raum Variante B-B-3-18



B_B_3_18	$\Theta_{e, \text{Tag}} > 20 \text{ °C}$		Sommerwoche	
	[hr]	[-]	[hr]	[-]
> Obergrenze	0		0	
Kat. C, oben	523	39%	81	48%
Kat. B, oben	525	39%	62	37%
Kat. A, oben	243	18%	25	15%
Kat. A, unten	42	3%	0	
Kat. B, unten	11	1%	0	
Kat. C, unten	0		0	
< Untergrenze	0		0	
Summe:	1344	100%	168	100%

Abbildung A 26: EN ISO 7730 (2006) Variante B-B-3-18

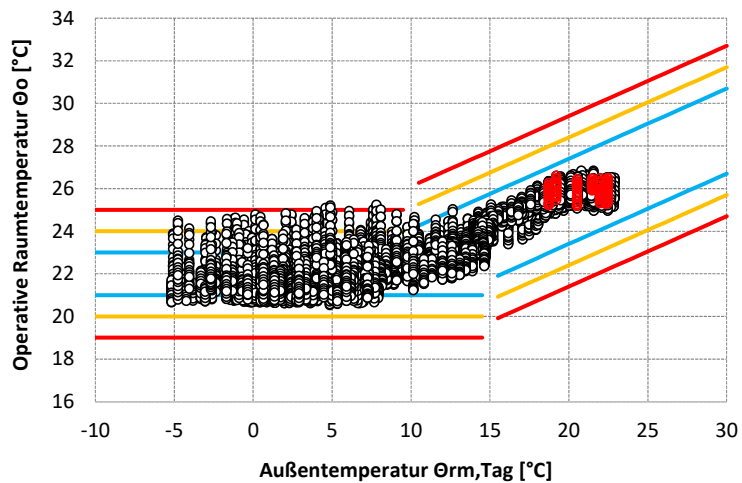
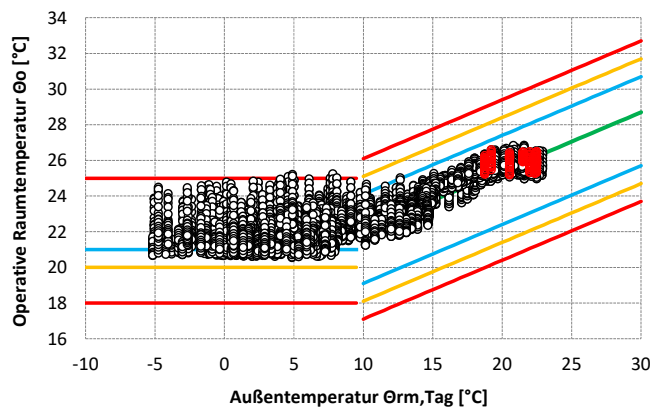
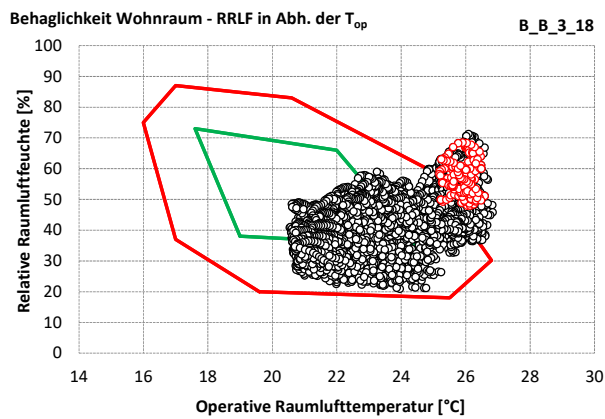


Abbildung A 27: DIN 15251 (2007) Variante B-B-3-18



B_B_3_18	$\Theta_{m, Tag} > 10 \text{ °C}$		Sommerwoche	
	[hr]	[-]	[hr]	[-]
> Obergrenze	0		0	
Kat. C, oben	0		0	
Kat. B, oben	1	0%	0	
Kat. A, oben	2 936	62%	108	64%
Kat. A, unten	1 791	38%	60	36%
Kat. B, unten	0		0	
Kat. C, unten	0		0	
< Untergrenze	0		0	
	4728		168	

Abbildung A 28: Darstellung EN 16798-1 (2019) Variante B-B-3-18



B_B_3_18	Jahr		Sommerwoche	
	[hr]	[-]	[hr]	[-]
angenehm behaglich	2 773	32%	0	0%
ausreichend behaglich	4 410	50%	5	3%
unbehaglich	1 577	18%	163	97%
Summe	8 760	100%	168	100%

Abbildung A 29: Darstellung Behaglichkeit in Bezug auf Raumluftfeuchte Variante B-B-3-18

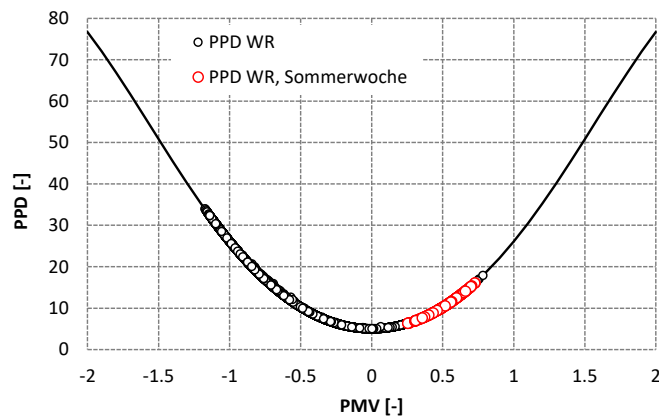


Abbildung A 30: Darstellung des PPD-Index in Abhängigkeit des PMV-Index Variante B-B-3-18

A5. Auswertung Variante B-B-8-18

Tabelle A 4: Eckdaten Fußbodenkühlung Variante B-B-8-18

abgeführte Wärmemenge	274	kWh/a		
abgeführte Wärmemenge, spez.	5.69	kWh/(m ² a)		
aktive Kühlung	214	h		
mittlere Temperaturabsenkung	1.6	K		
maximale Temperaturabsenkung	2.4	K		
Kondensation Parkett	0	h	0	min
Kondensation Estrich	-	h	-	min

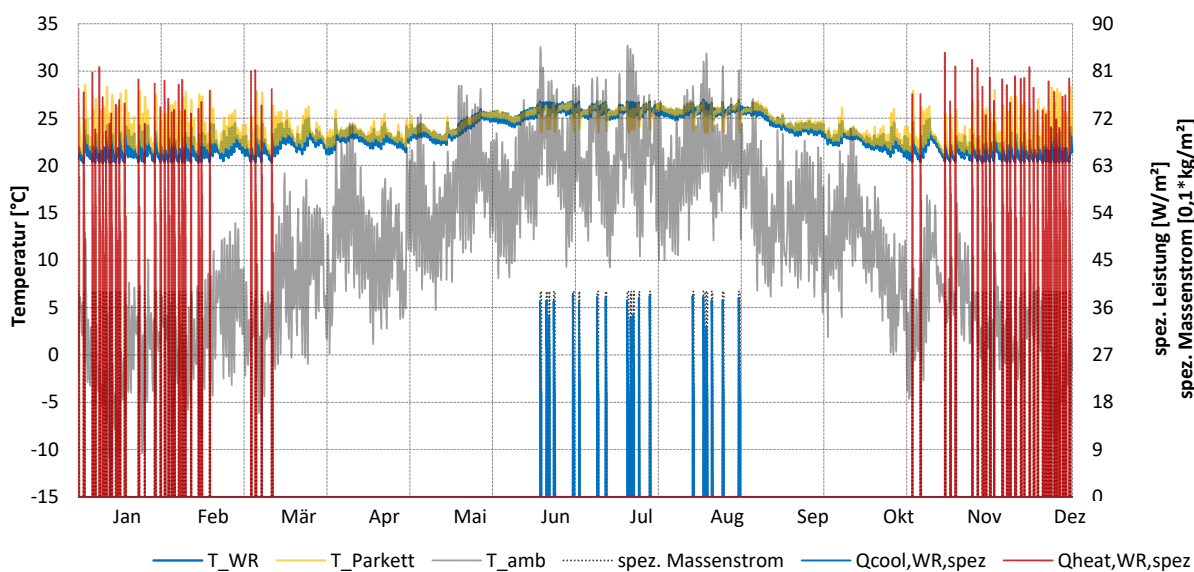


Abbildung A 31: Darstellung Jahresverlauf Variante B-B-8-18

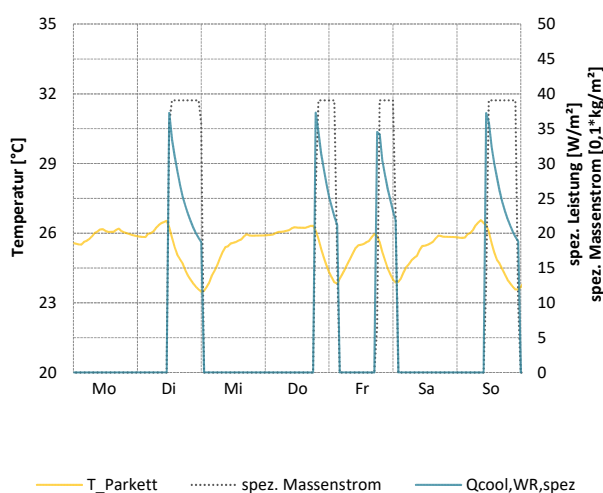


Abbildung A 32: Darstellung Sommerwoche Kühlung Variante B-B-8-18

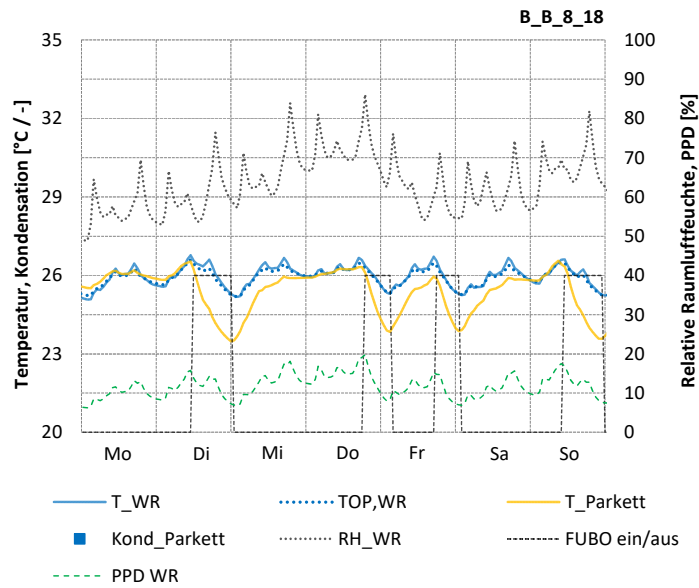


Abbildung A 33: Darstellung Sommerwoche Fußboden und Raum Variante B-B-8-18

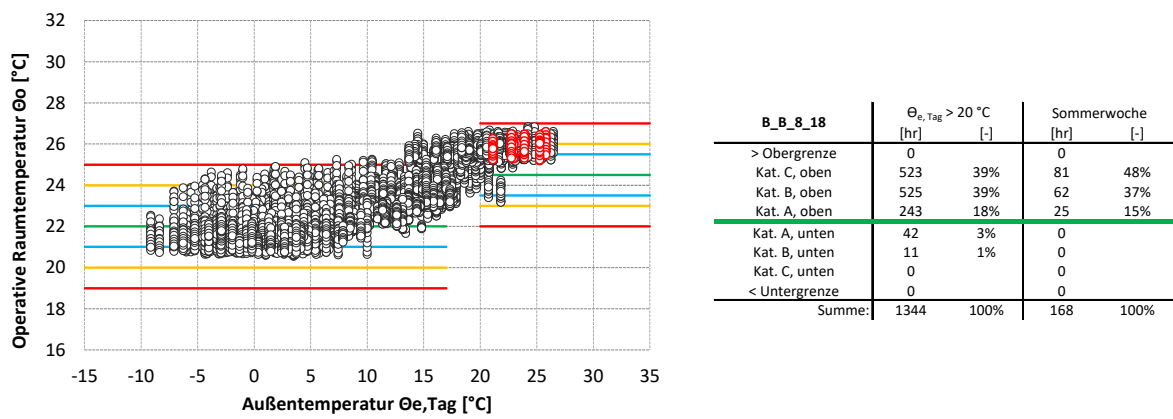


Abbildung A 34: EN ISO 7730 (2006) Variante B-B-8-18

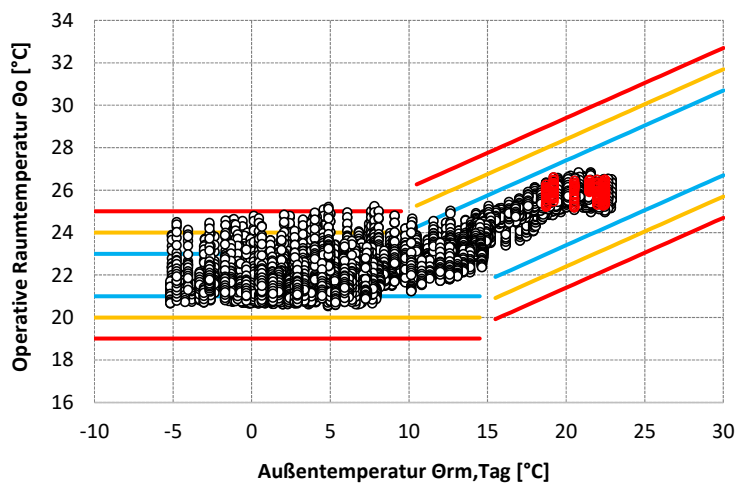
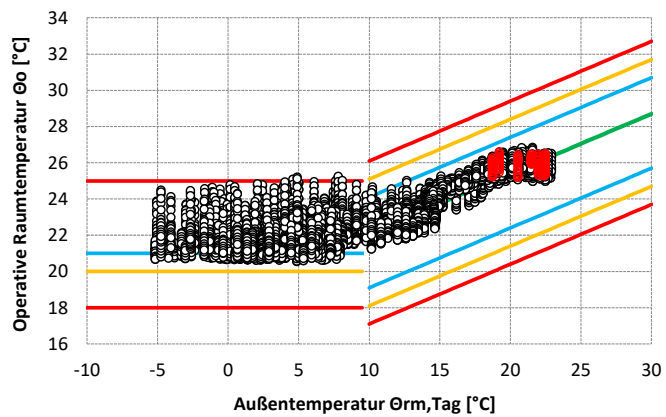
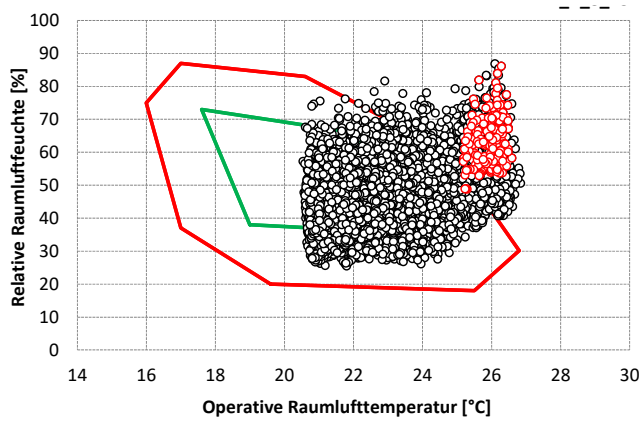


Abbildung A 35: DIN 15251 (2007) Variante B-B-8-18



B_B_8_18	$\Theta_{rm, Tag} > 10^\circ C$		Sommerwoche	
	[hr]	[-]	[hr]	[-]
Kat. C, oben	0		0	
Kat. B, oben	0		0	
Kat. A, oben	2 936	62%	108	64%
Kat. A, unten	1 791	38%	60	36%
Kat. B, unten	0		0	
Kat. C, unten	0		0	
< Untergrenze	0		0	
	4728		168	

Abbildung A 36: Darstellung EN 16798-1 (2019) Variante B-B-8-18



B_B_8_18	Jahr		Sommerwoche	
	[hr]	[-]	[hr]	[-]
angenehm behaglich	3 648	42%	0	0%
ausreichend behaglich	3 056	35%	4	2%
unbehaglich	2 056	23%	164	98%
Summe	8 760	100%	168	100%

Abbildung A 37: Darstellung Behaglichkeit in Bezug auf Raumluftfeuchte Variante B-B-8-18

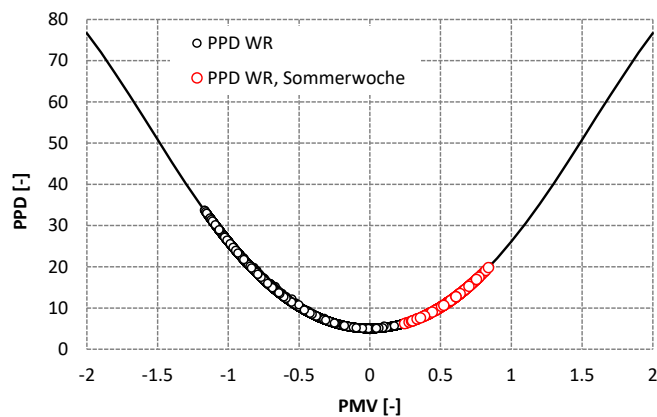


Abbildung A 38: Darstellung des PPD-Index in Abhängigkeit des PMV-Index Variante B-B-8-18

A6. Auswertung Variante E-B-3-18

Tabelle A 5: Eckdaten Fußbodenkühlung Variante E-B-3-18

abgeführte Wärmemenge	272	kWh/a		
abgeführte Wärmemenge, spez.	5.64	kWh/(m ² a)		
aktive Kühlung	222	h		
mittlere Temperaturabsenkung	1.6	K		
maximale Temperaturabsenkung	2.4	K		
Kondensation Parkett	0	h	0	min
Kondensation Estrich	0	h	0	min

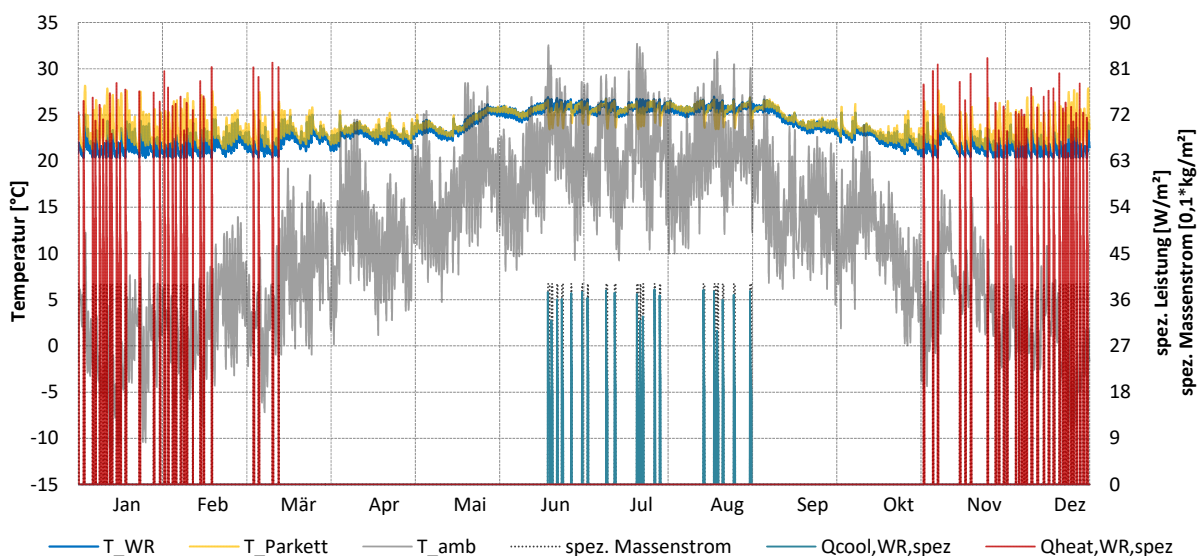


Abbildung A 39: Darstellung Jahresverlauf Variante E-B-3-18

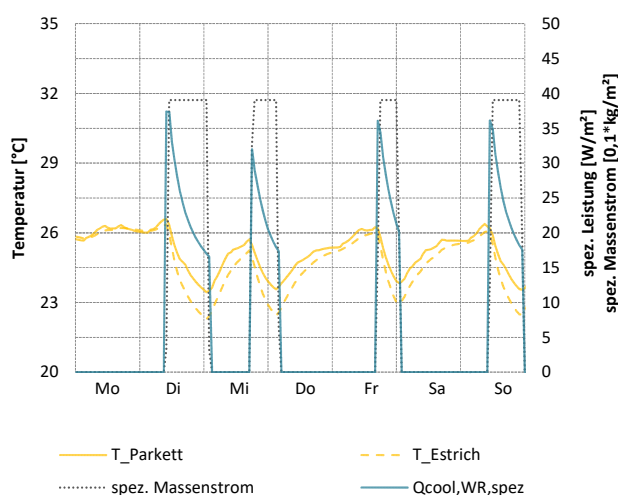


Abbildung A 40: Darstellung Sommerwoche Kühlung Variante E-B-3-18

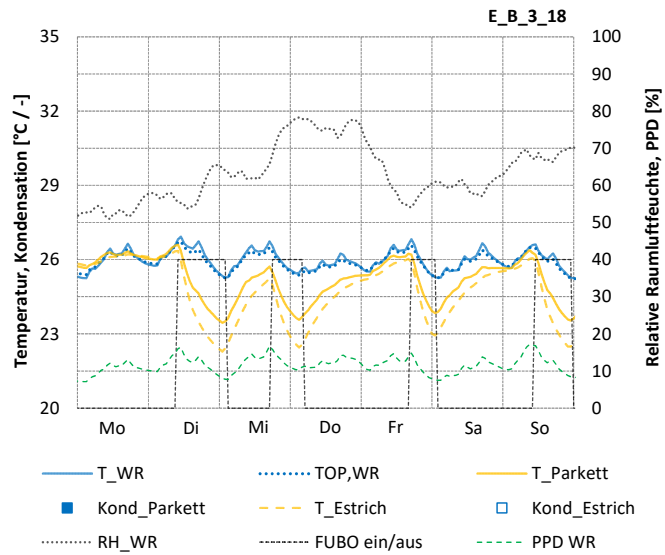
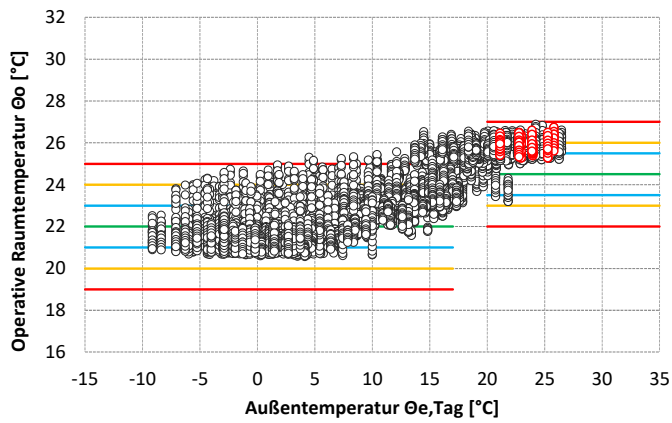


Abbildung A 41: Darstellung Sommerwoche Fußboden und Raum Variante E-B-3-18



E_B_3_18	$\Theta_{e,Tag} > 20\text{ °C}$		Sommerwoche	
	[hr]	[-]	[hr]	[-]
> Obergrenze	0		0	
Kat. C, oben	460	34%	73	43%
Kat. B, oben	579	43%	70	42%
Kat. A, oben	257	19%	25	15%
Kat. A, unten	37	3%	0	
Kat. B, unten	11	1%	0	
Kat. C, unten	0		0	
< Untergrenze	0		0	
Summe:	1344	100%	168	100%

Abbildung A 42: EN ISO 7730 (2006) Variante E-B-3-18

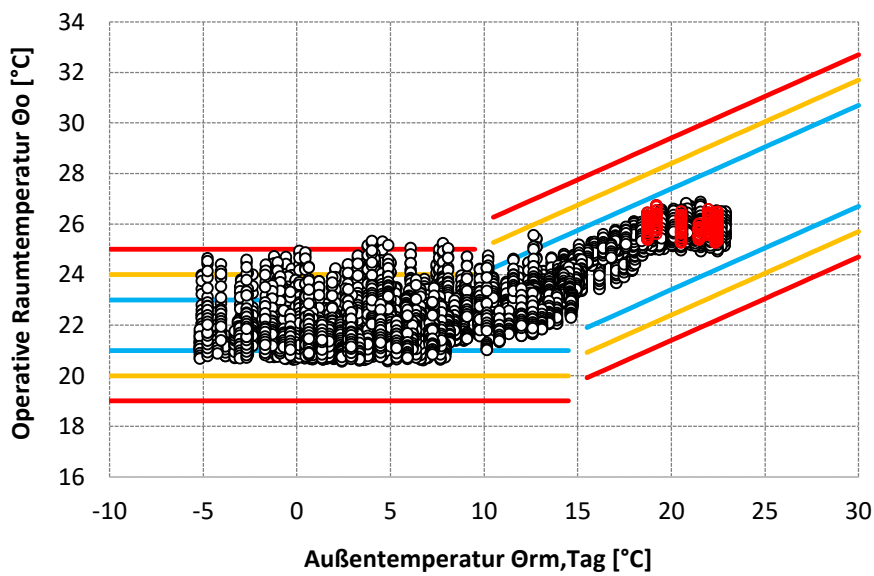
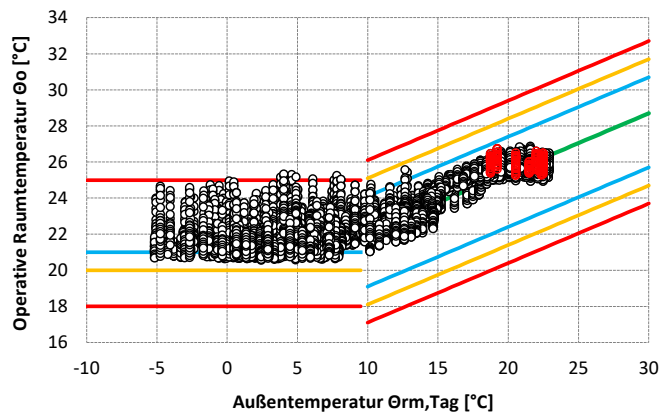
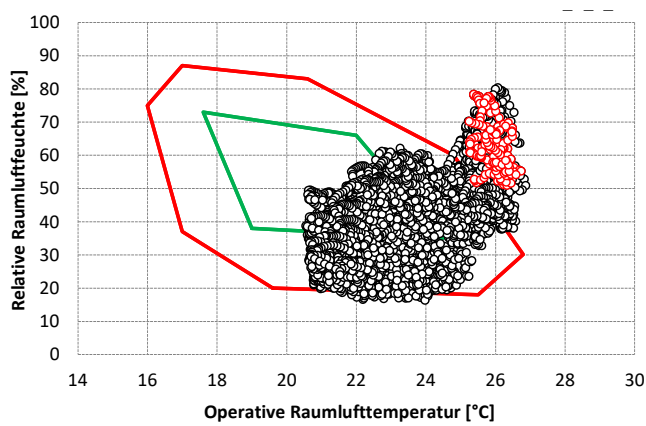


Abbildung A 43: DIN 15251 (2007) Variante E-B-3-18



E_B_3_18	$\Theta_{rm,Tag} > 10\text{ °C}$		Sommerwoche	
	[hr]	[-]	[hr]	[-]
> Obergrenze	0		0	
Kat. C, oben	0		0	
Kat. B, oben	7	0%	0	
Kat. A, oben	2 874	61%	88	52%
Kat. A, unten	1 847	39%	80	48%
Kat. B, unten	0		0	
Kat. C, unten	0		0	
< Untergrenze	0		0	
	4728		168	

Abbildung A 44: Darstellung EN 16798-1 (2019) Variante E-B-3-18



E_B_3_18	Jahr		Sommerwoche	
	[hr]	[-]	[hr]	[-]
angenehm behaglich	2 179	25%	0	0%
ausreichend behaglich	4 659	53%	0	0%
unbehaglich	1 922	22%	168	100%
Summe	8 760	100%	168	100%

Abbildung A 45: Darstellung Behaglichkeit in Bezug auf Raumluftfeuchte Variante E-B-3-18

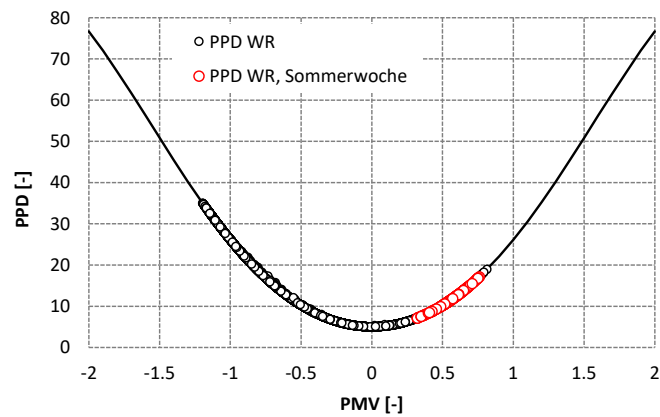


Abbildung A 46: Darstellung des PPD-Index in Abhängigkeit des PMV-Index Variante E-B-3-18

A7. Auswertung Variante E-B-8-14

Tabelle A 6: Eckdaten Fußbodenkühlung Variante E-B-8-14

abgeführte Wärmemenge	276	kWh/a		
abgeführte Wärmemenge, spez.	5.74	kWh/(m ² a)		
aktive Kühlung	148	h		
mittlere Temperaturabsenkung	1.7	K		
maximale Temperaturabsenkung	2.7	K		
Dauer Kondensation Parkett	3	h	35	min
Dauer Kondensation Estrich	15	h	10	min

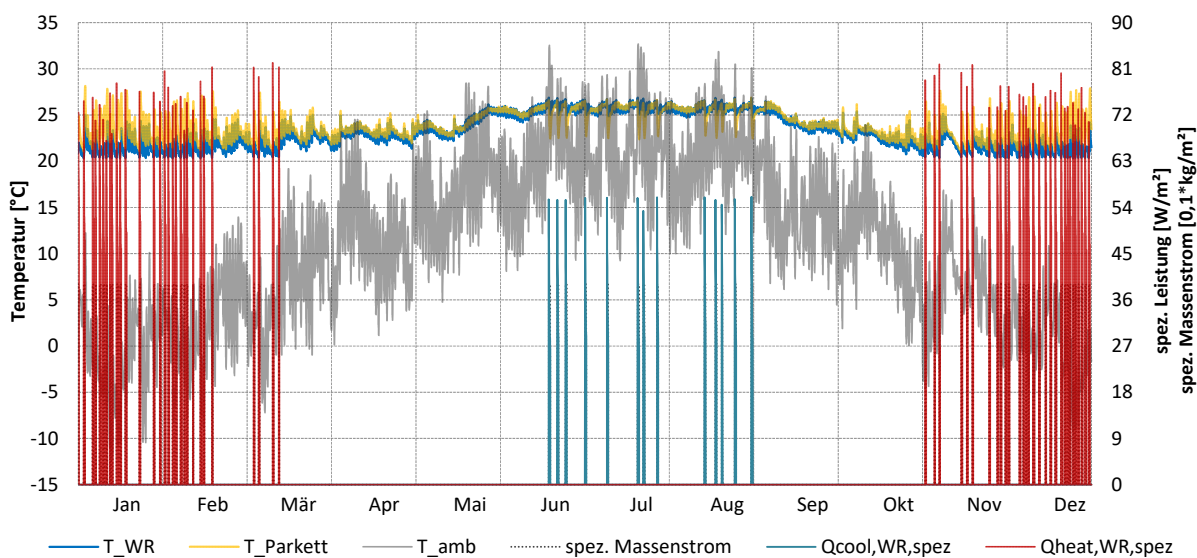


Abbildung A 47: Darstellung Jahresverlauf Variante E-B-8-14

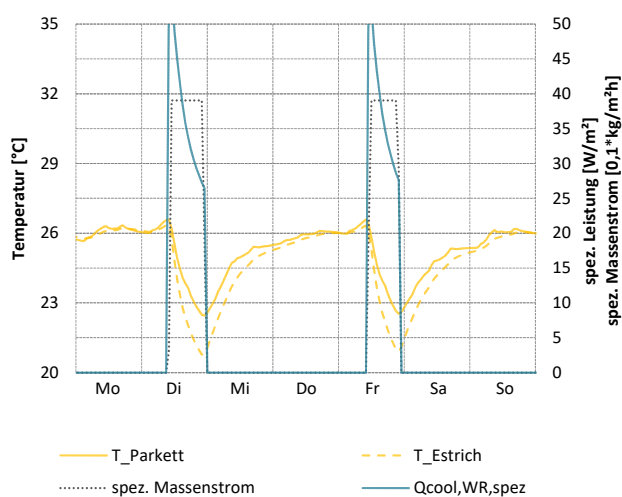


Abbildung A 48: Darstellung Sommerwoche Kühlung Variante E-B-8-14

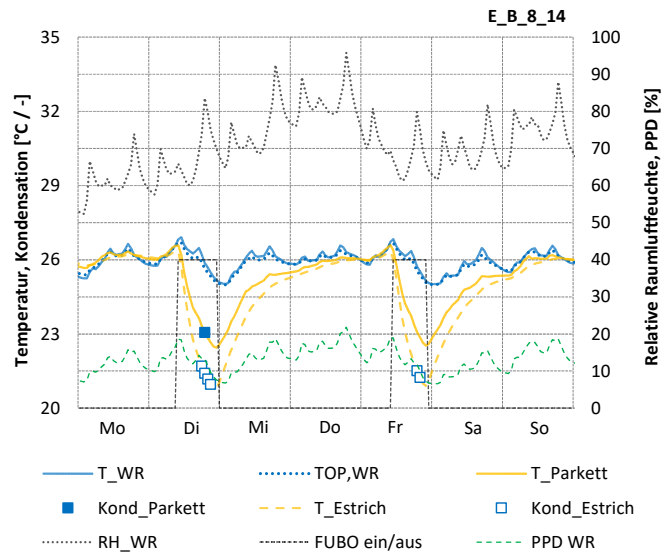
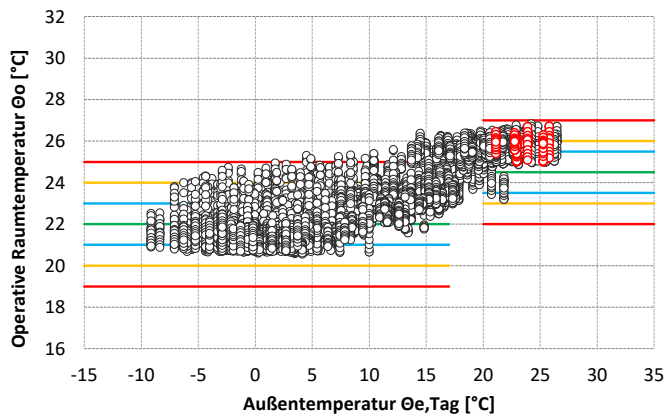


Abbildung A 49: Darstellung Sommerwoche Fußboden und Raum Variante E-B-8-14



E_B_8_14	$\Theta_{e,Tag} > 20\text{ °C}$		Sommerwoche	
	[hr]	[-]	[hr]	[-]
> Obergrenze	0		0	
Kat. C, oben	413	31%	81	48%
Kat. B, oben	527	39%	57	34%
Kat. A, oben	356	26%	30	18%
Kat. A, unten	37	3%	0	
Kat. B, unten	11	1%	0	
Kat. C, unten	0		0	
< Untergrenze	0		0	
Summe:	1344	100%	168	100%

Abbildung A 50: EN ISO 7730 (2006) Variante E-B-8-14

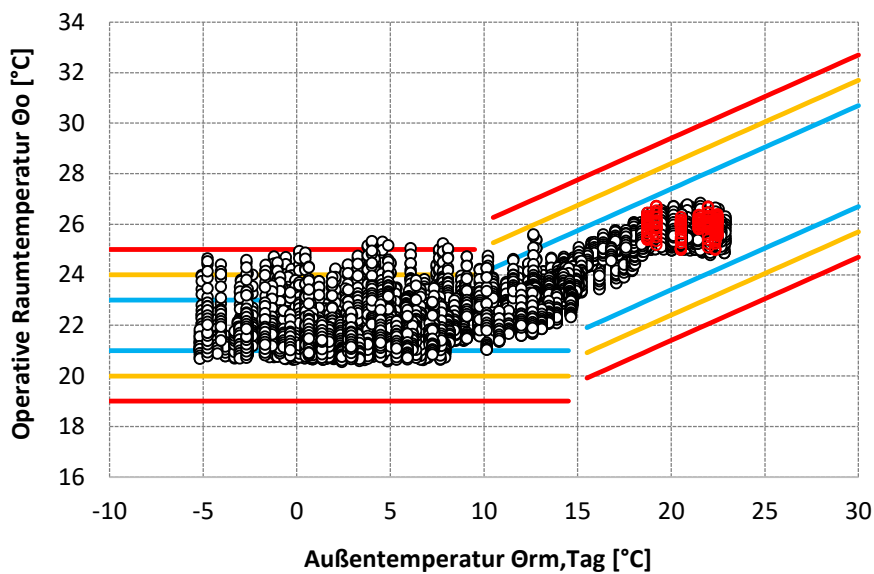
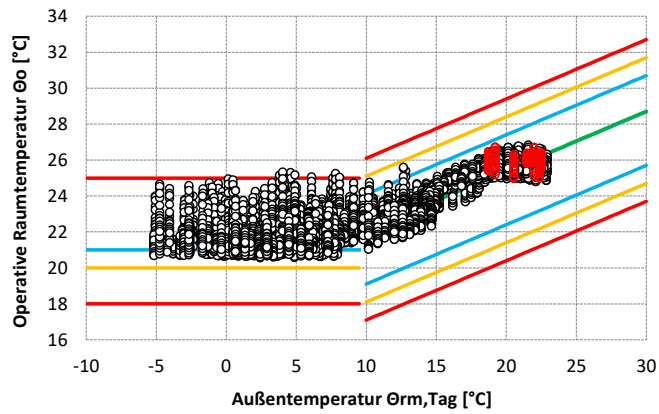
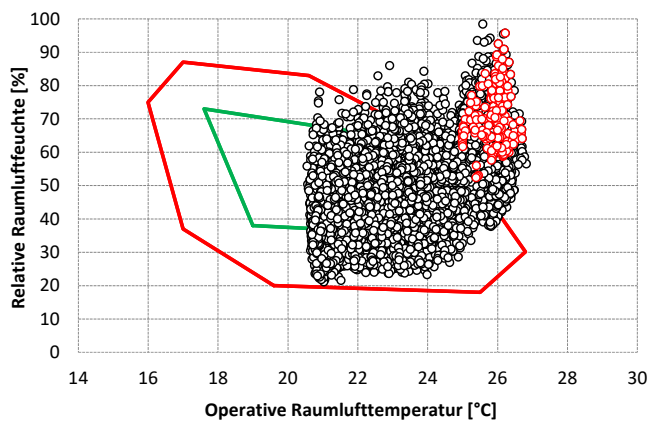


Abbildung A 51: DIN 15251 (2007) Variante E-B-8-14



E_B_8_14	$\Theta_{rm, Tag} > 10\text{ °C}$		Sommerwoche	
	[hr]	[-]	[hr]	[-]
> Obergrenze	0		0	
Kat. C, oben	0		0	
Kat. B, oben	7	0%	0	
Kat. A, oben	2 791	59%	103	61%
Kat. A, unten	1 930	41%	65	39%
Kat. B, unten	0		0	
Kat. C, unten	0		0	
< Untergrenze	0		0	
	4728		168	

Abbildung A 52: Darstellung EN 16798-1 (2019) Variante E-B-8-14



E_B_8_14	Jahr		Sommerwoche	
	[hr]	[-]	[hr]	[-]
angenehm behaglich	3 199	37%	0	0%
ausreichend behaglich	3 118	36%	0	0%
unbehaglich	2 443	28%	168	100%
Summe	8 760	100%	168	100%

Abbildung A 53: Darstellung Behaglichkeit in Bezug auf Raumluftfeuchte Variante E-B-8-14

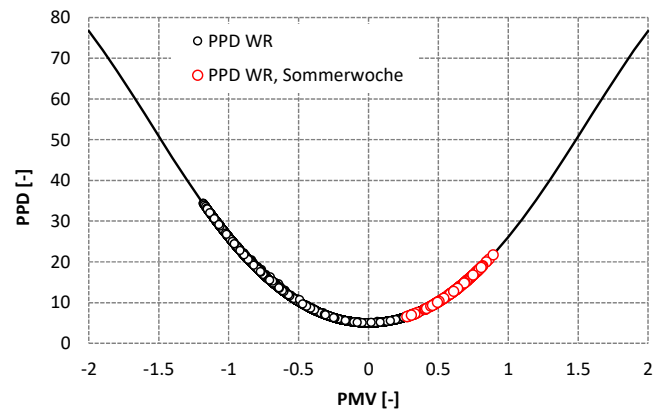


Abbildung A 54: Darstellung des PPD-Index in Abhängigkeit des PMV-Index Variante E-B-8-14

A8. Auswertung Variante E-B-8-opt

Tabelle A 7: Eckdaten Fußbodenkühlung Variante E-B-8-opt

abgeführte Wärmemenge	216	kWh/a		
abgeführte Wärmemenge, spez.	4.48	kWh/(m ² a)		
aktive Kühlung	381	h		
mittlere Temperaturabsenkung	1.4	K		
maximale Temperaturabsenkung	2.3	K		
Kondensation Parkett	0	h	0	min
Kondensation Estrich	0	h	0	min

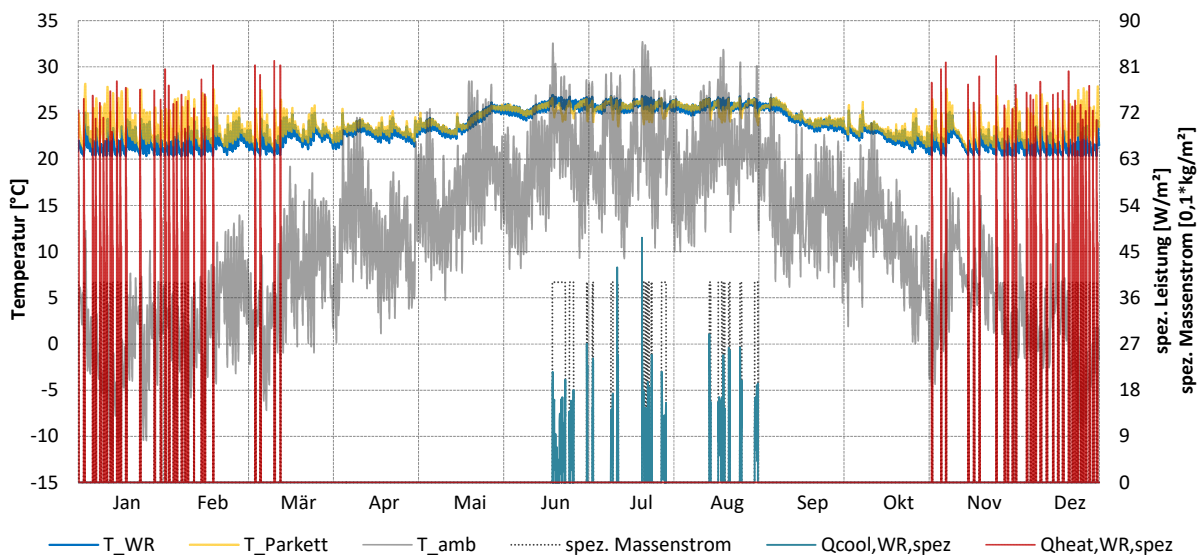


Abbildung A 55: Darstellung Jahresverlauf Variante E-B-8-opt

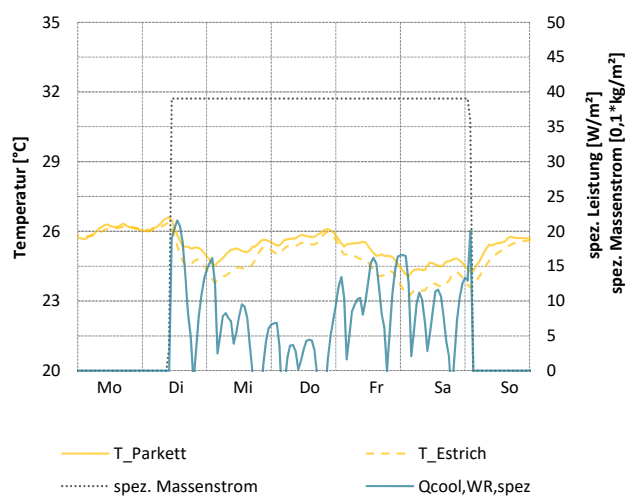


Abbildung A 56: Darstellung Sommerwoche Kühlung Variante E-B-8-opt

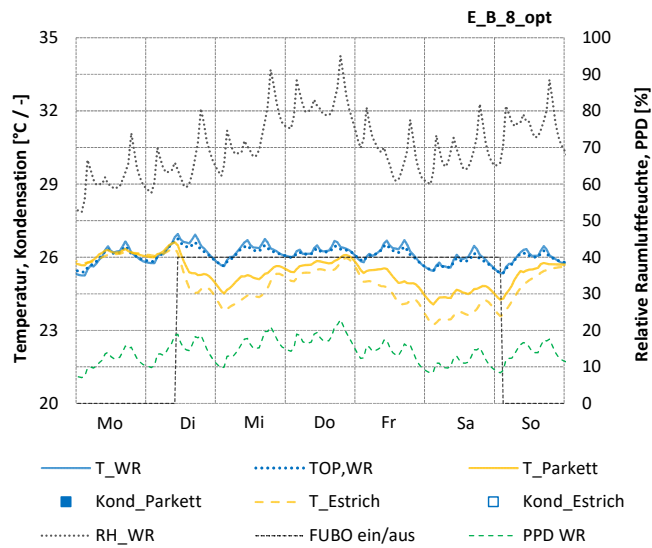
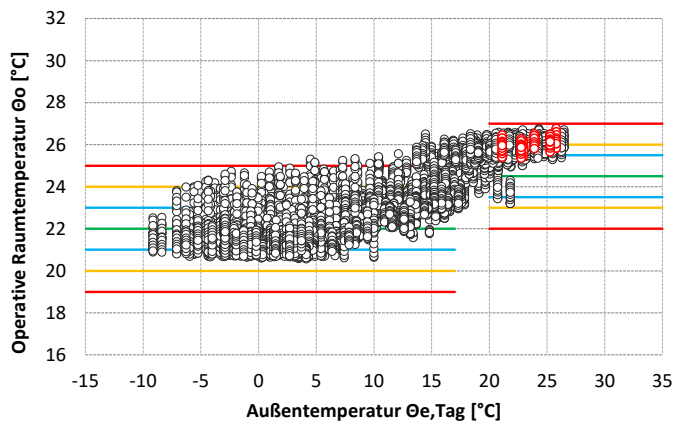


Abbildung A 57: Darstellung Sommerwoche Fußboden und Raum Variante E-B-8-opt



E_B_8_opt	$\Theta_{e,Tag} > 20\text{ °C}$		Sommerwoche	
	[hr]	[-]	[hr]	[-]
> Obergrenze	0		0	
Kat. C, oben	524	39%	104	62%
Kat. B, oben	583	43%	54	32%
Kat. A, oben	189	14%	10	6%
Kat. A, unten	37	3%	0	
Kat. B, unten	11	1%	0	
Kat. C, unten	0		0	
< Untergrenze	0		0	
Summe:	1344	100%	168	100%

Abbildung A 58: EN ISO 7730 (2006) Variante E-B-8-opt

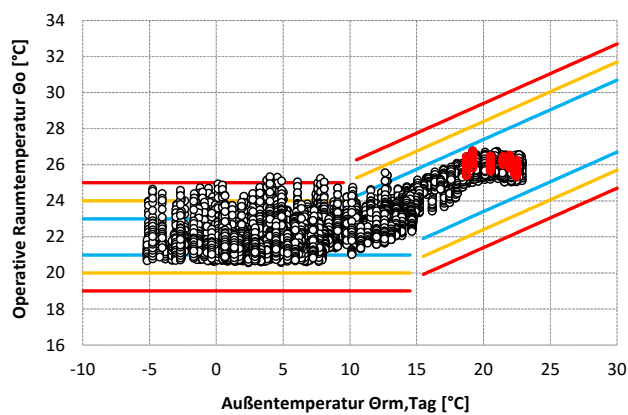
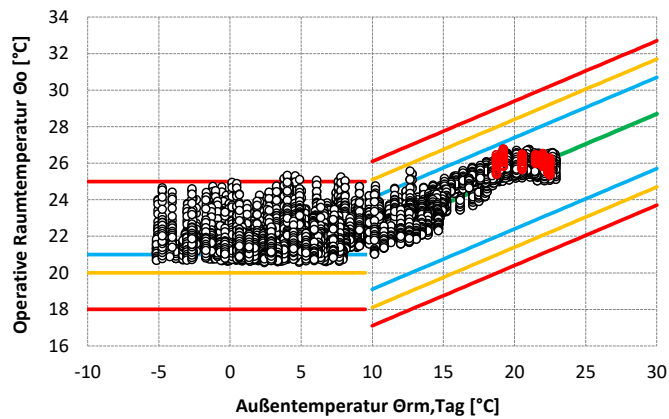
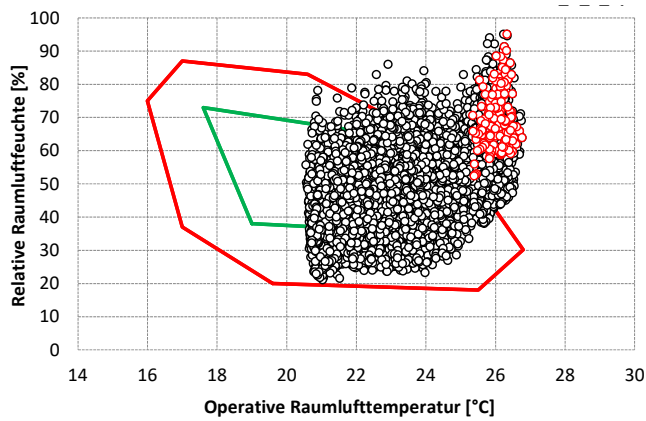


Abbildung A 59: DIN 15251 (2007) Variante E-B-8-opt



E_B_8_opt	Θ _{rm,Tag} > 10 °C		Sommerwoche	
	[hr]	[-]	[hr]	[-]
> Obergrenze	0		0	
Kat. C, oben	0		0	
Kat. B, oben	7	0%	0	
Kat. A, oben	2 956	63%	114	68%
Kat. A, unten	1 765	37%	54	32%
Kat. B, unten	0		0	
Kat. C, unten	0		0	
< Untergrenze	0		0	
	4728		168	

Abbildung A 60: Darstellung EN 16798-1 (2019) Variante E-B-8-opt



E_B_8_opt	Jahr		Sommerwoche	
	[hr]	[-]	[hr]	[-]
angenehm behaglich	3 197	36%	0	0%
ausreichend behaglich	3 121	36%	0	0%
unbehaglich	2 442	28%	168	100%
Summe	8 760	100%	168	100%

Abbildung A 61: Darstellung Behaglichkeit in Bezug auf Raumluftfeuchte Variante E-B-8-opt

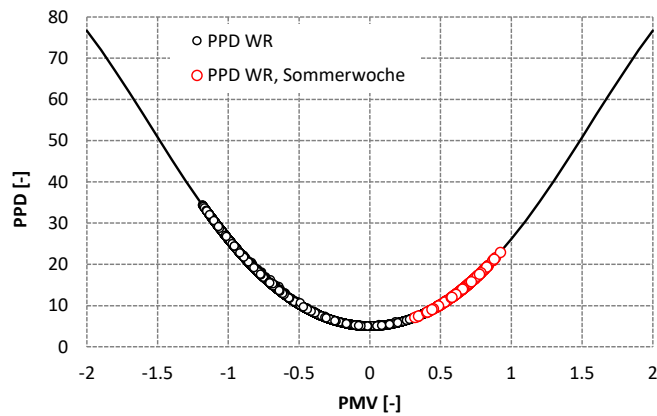


Abbildung A 62: Darstellung des PPD-Index in Abhängigkeit des PMV-Index Variante E-B-8-opt