

---

# Modellierung der Interaktion von Gebäudenutzer\*innen und Gebäudetechnik

- Potenzialanalyse dezentraler Heiz- und  
Kühlsysteme hinsichtlich der thermischen  
Behaglichkeit und des Energieverbrauchs auf Basis  
eines adaptiven Gebäudereglers -

---

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen  
der Technischen Universität Kaiserslautern  
zur Verleihung des akademischen Grades

**Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**

genehmigte

**DISSERTATION**

Vorgelegt von

**M. Eng. Katharina Boudier**

aus Urexweiler

Promotionskommission:

Vorsitz: Prof. Dr. rer. nat. Oliver Kornadt

1. Berichterstatterin: Prof. Dr.-Ing. Sabine Hoffmann

2. Berichterstatter: Prof. Edward Arens, Phd

Datum der Disputation: 18. März 2021

Kaiserslautern 2021

(D 386)

---



## Vorwort

Diese Arbeit entstand an der Technischen Universität Kaiserslautern am Fachgebiet Gebäudesysteme und Gebäudetechnik des Fachbereichs Bauingenieurwesen. Meinen großen Dank möchte ich folgenden Personen aussprechen, die mich während der Entstehung dieser Arbeit unterstützt haben.

An erster Stelle gilt mein Dank Prof. Dr.-Ing. Sabine Hoffmann einerseits für die Aufnahme in das Team und für die vertrauensvolle Überlassung des Promotionsthemas und andererseits für das Stipendium, das es mir ermöglicht hat, an dem Thema zu arbeiten. Danken möchte ich ihr auch für die große Unterstützung in Form des wissenschaftlichen Austausches, ihren motivierenden Zuspruch und die ermöglichte Teilhabe an den Erfahrungen während der gesamten Bearbeitungsphase meiner Dissertation.

Weiterhin möchte ich Edward Arens, Phd sowohl für die Betreuung meiner Dissertation als auch die fachlichen Anregungen, Diskussionen und die schnelle Bewertung danken.

Dieses Projekt beruht auf der Kopplung eines „Physiology, Sensation and Comfort“ Modells (PhySCo) und der Gebäudesimulationssoftware Esp-r. Die ersten Ansätze der Kopplung zwischen PhySCo und Esp-r basieren auf einem geförderten Projekt („PPP Australien“) des DAAD (Deutscher Akademischer Austauschdienst) mit dem Sustainable Building Research Center der Universität von Wollongong.

Die Weiterentwicklung des Projektes erfolgte an der Universität in Kaiserslautern am Fachgebiet Gebäudesysteme und Gebäudetechnik. Ich möchte mich bei allen meinen Kollegen bedanken, die zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben. Insbesondere sind Raghuram Kalyanam, Abolfazl Ganji Kheybari und Mohamad Rida zu erwähnen.

Die Kopplung konnte mit der Hilfe von Raghuram Kalyanam umgesetzt werden, der sich mit dem Programmieren der Programme Esp-r, dem Physiologie- und dem „Sensation and Comfort Model“ auseinandersetzte und mir stets für alle programmiertechnischen Fragen zur Verfügung stand.

Der Ansatz „(Wo)Man in Cube“ (Kapitel 5.3.2), der essenziell zur Ermittlung präziser MRT-Werte (engl. „Mean Radiant Temperature“) nötig war, wurde in Zusammenarbeit mit Abolfazl Ganji Kheybari entwickelt. Die Simulationsstudien wurden von mir durchgeführt und eine Auswertung sowie eine Publikation der durchgeführten Arbeiten erfolgte gemeinsam.

Ein weiterer Dank geht an meinen Kollegen Mohamad Rida, der ein geschätzter Kollege für alle Diskussionen und Anregungen bezüglich Physiologie-Modellen und Gebäudesimulationen wurde. Er unterstützte die stetige Weiterentwicklung des Projektes beispielsweise durch die gemeinsame Durchführung der Sollwertanalyse für das „Sensation and Comfort Model“ (Kapitel 5.1.1).

Weiterhin möchte ich allen Kolleg\*innen und unserer Sekretärin Frau Köhler des Fachgebiets Gebäudesysteme und Gebäudetechnik für die freundschaftliche Atmosphäre

und die stete Hilfsbereitschaft danken, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Für die vielen lieben Worte und das gute Zusprechen möchte ich Kristina und Verena danken. Danken möchte ich außerdem Isabelle für das Korrekturlesen.

Robert und Elmar danke ich herzlich für das Korrekturlesen, die Ratschläge und die angenehme Zeit während meiner Klausur.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern und meinen Geschwistern dafür, dass sie immer für mich da waren und mich zu dem gemacht haben, was ich heute bin. Hier sei auch die Kinderbetreuung erwähnt, die vieles erleichtert und ermöglicht hat.

Besonders möchte ich an dieser Stelle auch Dominic und unseren Kindern Mathilde und Lewin für die große Unterstützung, ihre Geduld und die unermüdliche Motivation danken.

## Abstract

Local thermal comfort plays a growing role in terms of occupant satisfaction and in the energy performance of a building. To improve thermal comfort of occupants, decentralized heating and cooling systems are getting more interest in the research community but also in the market. Some studies have also shown that they can reduce the heating and cooling demand of buildings. These systems can be for example, an office chair with heating and cooling function, a thermoelectric heating and cooling wall or even a table fan.

Building simulation software is used to optimize the energy performance of buildings during the planning process, but just a few programs enable detailed comfort calculations. Programs which allow the usage of decentralized heating and cooling systems are totally missing.

This dissertation presents a newly developed adaptive building controller for combined, central and decentralized systems inside the building simulation software ESP-r. The building controller adapts the setpoint-temperatures of the central heating and cooling system and regulates the usage of decentralized systems, based on the thermal sensation and comfort values of a virtual thermal manikin in the considered building zone.

This work shall contribute to the application of detailed comfort values within building simulation, which is also necessary to consider decentralized heating and cooling systems like the thermoelectric movable partition or the office chair with heating and cooling function.

The first step by the development of the adaptive controller, was the coupling of PhySCo, a "Physiology, Sensation and Comfort" model with the building simulation software Esp-r. The physiology model within PhySCo uses the values of room temperature, mean radiant temperature, air velocity, relative humidity, solar radiation as well as personal parameters such as clothing and activity level. The model calculates skin and core temperatures for 16 individual body parts under consideration of thermophysiological control mechanisms such as sweating, shivering, vasodilatation and vasoconstriction of the blood vessels. These values are used to calculate local and overall sensation and comfort values. Within the adaptive building controller, the local and overall sensation and comfort values are used to control the setpoint-temperatures of the central heating and cooling system, as well as to regulate the decentralized heating and cooling systems.

The adaptive building controller with a wide deadband, with setpoints of 18 to 26 °C was in simulation studies compared with a basic controller with a fixed and narrow setpoint range of 21 to 24 °C. The evaluation focused on the overall comfort values and on a possible reduction of the heating and cooling energy demand of the central system.

The results showed, that the adaptive controller could keep the comfort values at the same level as the basic controller and reduced the heating demand at the same time noticeably. The cooling load could also be reduced compared to the basic controller, but the reduction was much smaller compared to the heating load.

In the next step, the decentralized heating and cooling systems were added to the adaptive building controller. First the thermoelectric heating and cooling wall, followed by the office chair with heating and cooling function, then both systems were added to the adaptive controller and tested together.

The results show clearly that by adding the decentralized heating and cooling systems, the comfort could get further improved and at the same time, the heating and cooling energy demand could get reduced.

It was noticeable that during the summer simulation period, comfort was increased, though the increase was rather small. As an additional support, a fan was simulated, which increased the air velocity for the heat-sensitive head. Thereby, the comfort could be further increased, thus the cooling of the central system was also reduced. In addition, an increase of the upper set point to 30 °C was possible without reducing the comfort level.

The adaptive building controller enables a detailed comfort analysis within the building simulation software. It can also be used for the planning of decentralized heating and cooling systems and their effect on thermal comfort.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung.....	1
1.2	Herangehensweise.....	3
<b>2</b>	<b>Thermische Behaglichkeit im Gebäude .....</b>	<b>4</b>
2.1	Terminologie Behaglichkeit/Komfort.....	4
2.1.1	DIN EN ISO 7730.....	4
2.1.2	ASHRAE 55.....	6
2.2	Einflussgrößen auf die thermische Behaglichkeit.....	9
2.2.1	Raumlufttemperatur .....	9
2.2.2	Oberflächentemperatur .....	10
2.2.3	Luftgeschwindigkeit.....	10
2.2.4	Raumluftfeuchtigkeit .....	12
2.2.5	Solarstrahlung.....	14
2.3	Physiologie-Modelle des Menschen.....	14
2.3.1	Grundlagen thermophysiologicaler Vorgänge im Körper .....	14
2.3.2	Historische Entwicklung.....	19
2.4	Globale und lokale thermische Behaglichkeitsmodelle.....	26
2.4.1	Globale und stationäre Bewertungsmethoden und Behaglichkeitsmodelle .....	26
2.4.2	Lokale und veränderliche Behaglichkeitsmodelle und weitere Ansätze.....	29
2.5	Physiologie- und thermische Behaglichkeitsmodelle in der Gebäudesimulation.....	32
2.5.1	Gebäudesimulation mit dynamischen Behaglichkeitsmodellen .....	33
<b>3</b>	<b>Dezentrale Heiz- und Kühlsysteme .....</b>	<b>35</b>
3.1	Ansatz des „Personalized Environments“ .....	35
3.2	Beispiele für dezentrale Heiz- und Kühlsysteme .....	38
3.2.1	Bürostuhl mit Heiz- und Kühlfunktion .....	38
3.2.2	Mobile thermoelektrische Kühlwand.....	44
3.3	Berücksichtigung von dezentralen Heiz- und Kühlsystemen in der Gebäudesimulation.....	45
<b>4</b>	<b>PhySCo – “Physiology, Sensation and Comfort” Modell .....</b>	<b>47</b>
4.1	Physiologie-Modell.....	47
4.1.1	Besonderheiten des Modells.....	47

4.1.2	Passives System .....	49
4.1.3	Aktives System .....	54
4.2	Behaglichkeitsmodell „Sensation and Comfort Model“ .....	56
4.2.1	Lokales Empfinden .....	57
4.2.2	Globales Empfinden .....	58
4.2.3	Lokale Behaglichkeit.....	59
4.2.4	Globale Behaglichkeit.....	60
<b>5</b>	<b>Kopplung von PhySCo mit der Gebäudesimulationssoftware Esp-r ..</b>	<b>61</b>
5.1	PhySCo.....	61
5.1.1	Sollwertberechnung für thermisches Empfinden .....	62
5.1.2	PhySCo in der Anwendung.....	62
5.2	Die Gebäudesimulationssoftware Esp-r .....	66
5.2.1	Mittlere Strahlungstemperatur .....	68
5.2.2	Raumlufttemperatur.....	69
5.2.3	Luftfeuchtigkeit.....	70
5.2.4	Luftgeschwindigkeit.....	70
5.2.5	Solarstrahlung .....	71
5.3	Kopplung der beiden Programme.....	71
5.3.1	Datenaustausch zwischen PhySCo und Esp-r.....	71
5.3.2	Detaillierte MRT-Berechnung für die 16 lokalen Körperteile .....	73
5.3.3	Modellierung der dezentralen Systeme in Esp-r.....	77
<b>6</b>	<b>Der adaptive Gebäuderegler .....</b>	<b>79</b>
6.1	Allgemeine Grundlagen .....	79
6.1.1	Regelung und Steuerung .....	79
6.1.2	Grundlage des adaptiven Gebäudereglers in Esp-r.....	79
6.2	Regelungslogik des adaptiven Gebäudereglers mit zentralem System.....	82
6.2.1	Simulationsbeispiel zur adaptiven Sollwertanpassung .....	84
6.3	Regelungslogik für die dezentralen Heiz- und Kühlsysteme .....	87
6.3.1	Allgemein.....	87
6.3.2	Adaptiver Gebäuderegler für die thermoelektrische Wand.....	87
6.3.3	Adaptiver Gebäuderegler für den Bürostuhl mit Heiz- und Kühlfunktion .....	93
6.3.4	Adaptiver Gebäuderegler für den Ventilator.....	98
6.4	Mögliche Kombinationen von Gebäuderegler für zentrale und dezentrale Systeme .....	100

<b>7</b>	<b>Anwendung verschiedener Varianten des Gebäudereglers .....</b>	<b>101</b>
7.1	Gebäudemodell und Simulationsparameter .....	101
7.2	BCL00 / BCL34.....	102
7.3	BCL34 / BCL34_ThW .....	110
7.4	BCL34 / BCL34_Stuhl .....	117
7.5	BCL34 / BCL34_ThW_Stuhl.....	123
7.6	Varianten mit Ventilator .....	130
7.6.1	BCL34 / BCL34_ThW_Stuhl_Vent.....	130
7.6.2	BCL34 / BCL34_Stuhl_Vent .....	139
<b>8</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>148</b>
8.1	Winterzeitraum.....	148
8.1.1	Diagramme.....	149
8.1.2	Globale Behaglichkeit .....	150
8.1.3	Heizwärme und Kühlbedarf, Stromverbrauch und Endenergie .....	150
8.2	Übergangszeitraum .....	151
8.2.1	Diagramme.....	151
8.2.2	Globale Behaglichkeit .....	153
8.2.3	Heizwärme- und Kühlbedarf, Stromverbrauch und Endenergie.....	153
8.3	Sommerzeitraum.....	154
8.3.1	Diagramme.....	155
8.3.2	Globale Behaglichkeit .....	156
8.3.3	Heizwärme- und Kühlbedarf, Stromverbrauch und Endenergie.....	156
8.4	Synthese.....	157
8.5	Vergleich der Ergebnisse mit anderen Forschungsergebnissen .....	159
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>161</b>
9.1	Ziel.....	161
9.2	Vorgehensweise.....	162
9.3	Ergebnisse.....	163
<b>10</b>	<b>Bedeutung, Ausblick und Fazit.....</b>	<b>165</b>
10.1	Bedeutung der vorliegenden Arbeit.....	165
10.2	Potenzielle Weiterentwicklung des adaptiven Gebäudereglers mit und ohne dezentrale Systeme .....	166
10.3	Fazit.....	167

<b>Anhang A Daten für PhySCo und Kopplung .....</b>	<b>168</b>
<b>Anhang B Wetterdateien.....</b>	<b>177</b>
<b>Anhang C Histogramme: Behaglichkeitswerte der verschiedenen Gebäuderegler.....</b>	<b>181</b>
<b>Anhang D Diagramme zur weiteren Erläuterung.....</b>	<b>187</b>
<b>Nomenklatur .....</b>	<b>189</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Weltweit steht die drohende Klimaveränderung im Fokus der gesellschaftlichen Diskussion. Die deutsche Bundesregierung strebt bis Mitte des Jahrhunderts einen „nahezu klimaneutralen Gebäudebestand“ [1] an, dessen Energiebedarf ein wichtiger Bestandteil bei der Umsetzung der Energiewende ist. Somit steigen die Anforderungen an ein modernes, energieeffizientes und komfortables (Büro)Gebäude an.

Der private Gebäudebereich ist für etwa 26 % und der Gewerbebereich für etwa 15 % des Endenergieverbrauchs verantwortlich. Im Wohngebäudesektor sind 80 % des Endenergieverbrauchs für die Bereitstellung von Raumwärme und 1 % für Raumkühlung verantwortlich. Im Bereich der Nichtwohngebäude sind etwa 73 % des Endenergieverbrauchs auf die Raumwärme und 3 % auf die Raumkühlung zurückzuführen [2].

Der Anteil der benötigten Kühlenergie wird in den nächsten Jahren ansteigen [2], da durch die prognostizierte Klimaerwärmung mit höheren Umgebungstemperaturen zu rechnen ist.

Im Hinblick auf die Energiewende wurde und wird stetig an der Energieeffizienz von Gebäuden gearbeitet, dennoch besteht weiterhin großes Potenzial im Bereich der Energieeffizienz.

Ein Großteil des energieeffizienten Ausbaus entfällt auf die Wärmedämmmaßnahmen der äußeren Gebäudehülle und den winterlichen und sommerlichen Wärmeschutz. Ein weiterer Teil entfällt auf möglichst energieeffiziente Heiz- und Kühlanlagen und deren praktikable Steuerung. Schlussendlich stellt auch die Nutzung erneuerbarer Energien einen entscheidenden Faktor dar.

Auch der Bereich „Digitalisierung im Gebäudebereich“ erlangt zunehmend an Bedeutung in Wohn- und Nichtwohngebäuden.

*„Die Entwicklungen im Bereich Digitalisierung können ... einen wichtigen Beitrag bei der Umsetzung der Energiewende im Gebäudebereich leisten. Dazu gehören zum Beispiel die bessere Berücksichtigung von Energieeffizienzmaßnahmen ... sowie digitale Anwendungen für die Gebäudenutzung wie zum Beispiel die energieeffiziente Steuerung von Anlagen.“ [3]*

Hier ist auch der Bereich der „Smart-Home“ Anwendungen zu erwähnen. Dieser Bereich rückt sowohl für Wohn- als auch Nichtwohngebäude immer mehr in den Fokus. Mithilfe intelligenter Haustechnik können diese Systeme die Nutzer\*innen bei einer Verbrauchsanalyse unterstützen und dadurch zu einem energieeffizienteren Umgang mit den Ressourcen führen. Mithilfe dieser Systeme kann die Gebäudetechnik optimal auf die individuellen Bedürfnisse und Möglichkeiten der Gebäudenutzer\*innen abgestimmt werden [3].

Nicht nur im privaten Bereich, sondern auch in beruflich genutzten Gebäuden führt die Bereitstellung vermeintlich „behaglicher Raumtemperaturen“ häufig zu einem unverhältnismäßig hohen Energieverbrauch. Auch sind viele Gebäudenutzer\*innen oftmals mit den vorgegebenen Raumtemperaturen unzufrieden [4].

Ein Faktor, der das Einstellen scheinbar optimaler Temperaturen erschwert, ist das individuelle thermische Empfinden einzelner Personen [5]. Studien zeigen, dass sich Gebäudenutzer\*innen behaglicher fühlen, wenn ihnen die Möglichkeit gegeben wird, selbst Einfluss auf die unmittelbare thermische Umgebung zu nehmen [6].

Dies kann mit sogenannten dezentralen Heiz- und Kühlsystemen erreicht werden. Die Systeme beeinflussen das thermische Empfinden. Sie führen so zu einer Erweiterung der thermisch behaglichen Raumtemperaturen, indem niedrigere Heizsollwert- und höhere Kühltollwerttemperaturen der zentralen Heiz- und Kühlanlage zugelassen werden. Daraus kann wiederum eine Reduktion des Heizwärme- und Kühlbedarfs gegenüber herkömmlich genutzten Raumtemperaturreglern resultieren [7].

Die dezentralen Heiz- und Kühlsysteme sind in den meisten Fällen nicht ortsgebunden und benötigen in der Regel relativ wenig Energie, um das direkte thermische Umfeld des Menschen zu beeinflussen. Als Beispiele hierfür werden in dieser Arbeit ein Bürostuhl mit Heiz- und Kühlfunktion, eine thermoelektrische Stellwand mit Heiz- und Kühlfunktion und ein Tischventilator vorgestellt und auf ihre Effektivität überprüft.

Diese dezentralen Heiz- und Kühlsysteme sind für sich alleine vor allem im Bereich niedrigerer Raumtemperaturen (bis circa 18 °C) zur Einstellung eines Behaglichkeitslevels hilfreich. Der Behaglichkeitsbereich bei Vorliegen höherer Raumtemperaturen (circa 27 °C bis 30 °C) kann zusätzlich mithilfe von Ventilatoren, die speziell die Kopffregion ansprechen, erreicht werden [7–9].

Während der letzten Jahre kann ein zunehmend wachsendes Forschungsinteresse an dezentralen Heiz- und Kühlsystemen beobachtet werden. Zurzeit fehlt es jedoch an Planungswerkzeugen, um die Nutzung der dezentralen Systeme optimal mit der zentralen Heiz- und Kühlanlage abzustimmen und zur Interaktion mit Nutzer\*innen zu optimieren. Zur Planung der zentralen Heiz- und Kühlanlage und der allgemeinen Gebäudeleistung werden üblicherweise Gebäudesimulationsprogramme genutzt. Diese berücksichtigen jedoch keine dezentralen Systeme. Dies mag zum einen daran liegen, dass eine Berechnung detaillierter Empfindungs- und Behaglichkeitswerte nicht in allen Gebäudesimulationsprogrammen möglich ist und zum anderen der Einsatz der dezentralen Systeme noch nicht in Gebäudesimulationsprogrammen vorgesehen ist.

Diese Arbeit soll einen Beitrag dazu leisten, lokale, detaillierte thermische Empfindungs- und Behaglichkeitswerte innerhalb einer Gebäudesimulation zu berechnen und die Raumtemperaturen aus den resultierenden Ergebnissen der Empfindungs- und Behaglichkeitswerte zu steuern. Dies dient unter anderem der Berücksichtigung dezentraler Heiz- und Kühlsysteme innerhalb eines Gebäuderegler und soll zur Planung dieser Systeme genutzt werden.

## 1.2 Herangehensweise

Unter Einbeziehung des aktuellen Stands der Wissenschaft soll ein aktiver Beitrag dazu geleistet werden, ein Planungswerkzeug innerhalb der Gebäudesimulationssoftware zu entwickeln. Dies soll in der Lage sein, dezentrale Heiz- und Kühlsysteme zur Behaglichkeitssteigerung zu nutzen und im weiteren Sinne zur Reduzierung des Wärme- und Kühlbedarfs der zentralen Anlage beizutragen.

Der Begriff der Behaglichkeit bezieht sich hier schwerpunktmäßig auf ein thermisch behagliches Arbeitsumfeld und ist von anderen Behaglichkeitsaspekten wie beispielsweise visueller oder ergonomischer Behaglichkeit abzugrenzen.

Um die Behaglichkeit des Menschen zu bestimmen, ist es notwendig, physiologische Vorgänge des menschlichen Körpers zu verstehen. So erfolgt in Kapitel 2.2 die Vorstellung raumklimatischer Einflüsse auf den Menschen, in Kapitel 2.3, die Einführung der Grundlagen thermophysiologischer Vorgänge und ein historischer Rückblick auf die Entwicklung thermophysiologischer Modelle. In Kapitel 2.4 werden Modelle zur Berechnung der thermischen Behaglichkeit gezeigt. In Kapitel 2.5 werden Physiologie- und Behaglichkeitsmodelle in Gebäudesimulationsprogrammen wiedergegeben. Dies dient als Grundlage zum inhaltlichen Verständnis der Arbeit, bei der die Kopplung eines detaillierten „Physiology, Sensation and Comfort“ Modells (PhySCo) (Kapitel 4) mit einer Gebäudesimulationssoftware vorgestellt wird (Kapitel 5).

Mit den gekoppelten Modellen lassen sich transiente und asymmetrische klimatische Raumbedingungen ermitteln und, wie im Hauptteil dieser Arbeit vorgestellt, auch steuern und kontrollieren. Ein Schwerpunkt liegt in der Erstellung eines Gebäudereglers, der auf Grundlage der Empfindungs- und Behaglichkeitswerte adaptiv die Sollwerte der Raumtemperaturen steuert (Kapitel 6) und sofern notwendig dezentrale Heiz- und Kühlsysteme (Kapitel 3) zur weiteren effektiven Energienutzung hinzuzieht.

Gleichzeitig wurde überprüft, inwieweit der Heizwärme- und Kühlbedarf des Gebäudes durch die Kopplung einer Gebäudesimulationssoftware mit einem Physiologie-Modell und einem Behaglichkeits-Modell mithilfe eines neu implementierten Gebäudereglers verbessert werden kann und ob dabei eine Reduzierung des Wärme- und Kühlbedarfs möglich ist. Dazu wurde die Nutzung dezentraler Heiz- und Kühlsysteme hinzugezogen.

Die Intention der Arbeit im Hinblick auf eine praktische Anwendung im Alltag ist die Entwicklung eines Planungswerkzeugs, um die thermische Behaglichkeit innerhalb einer Gebäudesimulation zu ermitteln und auf dieser Basis den Einsatz dezentraler Heiz- und Kühlsysteme in Kombination mit zentralen Heiz- und Kühlanlagen zu planen.

## 2 Thermische Behaglichkeit im Gebäude

### 2.1 Terminologie Behaglichkeit/Komfort

Der Begriff „Behaglichkeit“ wurde 1857 in Pierer's Universal-Lexikon [10] als: „eine anhaltend angenehme Empfindung, besonders Zufriedenheit mit dem gegenwärtigen, schmerz- u. sorgenlosen Zustande.“ beschrieben.

Der Begriff der Behaglichkeit wird in dieser Arbeit synonym zur thermischen Behaglichkeit verwendet.

Das zugehörige Adjektiv „behaglich“ wird im Duden [10] als Synonym aufgeführt, für:

1. Behagen ausstrahlend, Wohlbehagen verbreitend, gemütlich, bequem
2. Mit Behagen genießend, genießerisch

Im Gegensatz dazu definiert sich der Begriff „Komfort“ als auf „technisch ausgereiften Einrichtungen beruhende Bequemlichkeiten, Annehmlichkeiten oder einen bestimmten Luxus bietende Ausstattung“ [10].

In der englischen Sprache werden Behaglichkeit und Komfort in ihrer inhaltlichen Bedeutung dem Begriff „comfort“ gleichgesetzt und als „*state of physical ease and freedom from pain or constraint*“ definiert. Dieser Begriff „comfort“ beschreibt einen Zustand von körperlicher Entspannung und die Freiheit von Schmerzen oder sonstigen Einschränkungen [11].

In ASHRAE [12] ist die thermische Behaglichkeit als „*that state of mind which expresses satisfaction with the thermal environment*“ definiert. Die thermische Behaglichkeit wird als Gemütszustand beschrieben, der die Zufriedenheit mit der thermischen Umgebung zum Ausdruck bringt. Der Mensch wünscht sich in diesem Zustand weder eine kältere noch eine wärmere Umgebungstemperatur.

Benzinger [13] definiert die thermische Behaglichkeit als: „*Die Abwesenheit solcher Impulse von beiden Rezeptorarten, welche Anlaß geben, die thermische Umgebung zu verändern*“. Er beschreibt die thermische Behaglichkeit als Abwesenheit sämtlicher neuronaler Impulse, was somit einem neutralen Temperaturempfinden gleichkommt.

#### 2.1.1 DIN EN ISO 7730

Die DIN EN ISO 7730 „Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit“ beschreibt Kriterien zur Bewertung thermischer Behaglichkeit bei gemäßigttem Umgebungsklima [14].

Sie unterscheidet bei der Ermittlung thermischer Behaglichkeit zwischen globaler und lokaler thermischer Behaglichkeit. Die globale Behaglichkeit wird als das thermische Gleichgewicht des Körpers beschrieben. Als lokale Parameter gelten lokale Temperaturunterschiede, bedingt durch vorliegende Strahlungsasymmetrien,

auftretende Zugluft und auch vertikale Temperaturunterschiede zwischen Füßen und Kopf.

Ein thermisches Gleichgewicht mit der Umgebung wird durch die Wärmebilanz des Körpers ausgedrückt. Diese hängt sowohl von persönlichen Parametern wie Aktivität und Bekleidung ab als auch von Umgebungsparametern wie Lufttemperatur, mittlerer Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchtigkeit (siehe Kapitel 2.2).

Mit diesen Parametern wird das „vorausgesagte mittlere Empfinden“ PMV („predicted mean vote“) berechnet. Der PMV-Index dient zur Beurteilung des Umgebungsklimas und zur Feststellung der Behaglichkeitskriterien, die dieses Umgebungsklima bedingen. Er stellt das durchschnittliche thermische Empfinden einer größeren Personengruppe mithilfe einer 7-stufigen Beurteilungsskala dar und wird mit Gleichung (2-1) berechnet.

Wird der PMV = 0 gesetzt, entspricht dies einem thermisch neutralen Empfinden. Der PMV-Wert wird anhand folgender Gleichungen berechnet [14]. Mit der Gleichung kann eine Kombination aus Aktivität, Bekleidung und Umgebungsparametern festgelegt werden, die zu einem thermisch neutralen Zustand führt.

$$\begin{aligned}
 PMV = & (0,303 * e^{-0,036M} + 0,028)[(M - W) - 3,05 \\
 & * 10^{-3}\{5733 - 6,99(M - W) - p_a\} \\
 & - 0,42\{(M - W) - 58,15\} - 1,7 * 10^{-5} * M(5867 - p_a) \quad (2-1) \\
 & - 0,014 * M(34 - t_a) - 3,96 * 10^{-8} \\
 & * f_{cl}\{(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4\} - f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)]
 \end{aligned}$$

Zur Berechnung des PMV-Wertes sind neben dem Energieumsatz M und der mechanischen Arbeit W die Umgebungsbedingungen wie Wasserdampfpartialdruck  $p_a$ , die Lufttemperatur  $t_a$  [°C] und die mittlere Strahlungstemperatur  $t_r$  erforderlich.

Weiterhin müssen die persönlichen Parameter wie der Bekleidungszustand  $t_{cl}$  und der Bekleidungsflächenfaktor  $f_{cl}$  bekannt sein. Zur Berechnung muss zusätzlich der konvektive Wärmeübergangskoeffizient  $h_c$  ermittelt werden (Gleichung (2-3)). Dazu wird die Luftgeschwindigkeit  $v_{ar}$  benötigt. Zur Bestimmung von  $f_{cl}$  muss der Bekleidungsisolationsgrad  $I_{cl}$  bekannt sein.

$$\begin{aligned}
 t_{cl} = & 35,7 - 0,028(M - W) \\
 & - I_{cl}\{3,96 * 10^{-8}f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} \\
 & * h_c(t_{cl} - t_a)\} \quad (2-2)
 \end{aligned}$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38 * |t_{cl} - t_a|^{0,25} & \text{für } 2,38 * |t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1 * \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 * \sqrt{v_{ar}} & \text{für } 2,38 * |t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12,1 * \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (2-3)$$

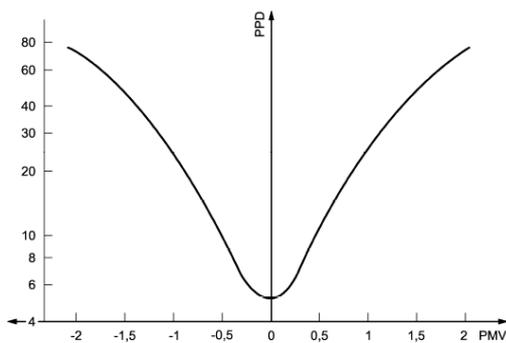
$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290I_{cl} & \text{für } I_{cl} \leq 0,078m^2 * \frac{K}{W} \\ 1,05 + 0,645I_{cl} & \text{für } I_{cl} > 0,078m^2 * \frac{K}{W} \end{cases} \quad (2-4)$$

Es gelten die in der Norm angegebenen Grenzwerte [14]. In einem weiteren Schritt wird mithilfe des PMV-Index der „Prozentsatz mit dem Umgebungsklima unzufriedener Personen“ PPD („predicted percentage of dissatisfied“) berechnet [14].

Der PPD beschreibt den Prozentsatz einer Personengruppe, die die thermischen Umgebungsbedingungen als unangenehm heiß oder kalt empfinden. Der PPD wird anhand der folgenden Gleichung berechnet [14].

$$PPD = 100 - 95 * \exp(-0,03353 * PMV^4 - 0,2179 * PMV^2) \quad (2-5)$$

Die folgende Grafik zeigt die Kurve des PPD. Anhand der Kurve ist deutlich zu sehen, dass sich niemals alle Personen gleichzeitig im selben Umgebungsklima behaglich fühlen. Selbst bei neutralen Bedingungen mit einem PMV im Bereich zwischen -0.5 bis +0.5 liegt ein geringer Prozentsatz von Personen vor, die sich nicht behaglich fühlen werden.



PMV-SKALA	
+3	Heiß
+2	Warm
+1	Leicht warm
0	Neutral
-1	Leicht kühl
-2	Kühl
-3	Kalt

Tabelle 2-1: PMV-Skala aus [15]

Abbildung 2-1: PPD als Funktion des PMV aus [14]

Nach DIN EN ISO 7730 wird ein „akzeptables“ Raumklima erreicht, wenn sich 80 % der Raumnutzer\*innen in einem thermisch akzeptablen neutralen Bereich befinden [14].

### 2.1.2 ASHRAE 55

Der Standard „ASHRAE 55“ [16], „ASHRAE“ – American Society of Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Engineers und „55“ für „Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy“ gibt Empfehlungen und Berechnungsmethoden vor, nach denen die thermische Behaglichkeit in Gebäuden sichergestellt werden soll. Die erste Veröffentlichung des Standards erfolgte 1966. Die zwei Modelle zur Behaglichkeitsberechnung PMV/PPD und das Adaptive Modell wurden im Jahr 2004 in ASHRAE 55 aufgenommen [17].

Beim Standard ASHRAE 55 erfolgt die Behaglichkeitsberechnung über die Berechnung der operativen Temperatur (Kapitel 2.4.1) oder mittels eines Programms, welches PMV und PPD berechnet.

Beim Standard ASHRAE 55 wird zusätzlich das Adaptive Modell für natürlich belüftete Räume vorgestellt. Es berücksichtigt die thermischen Präferenzen von Menschen unterschiedlicher Klimaregionen (Kapitel 2.4.2).

## Die Grafische Methode zur Ermittlung behaglicher Zonen

Bei der grafischen Methode werden Diagramme zur Ermittlung der operativen Temperatur (Kapitel 2.4.1) und der Luftfeuchtigkeit, in denen behagliche Zustände erreicht werden, verwendet. Begrenzende Faktoren der Diagramme sind die unterschiedlichen Bekleidungsfaktoren für Winter (1.0 clo) oder Sommer (0.5 clo) (Kapitel 2.3.1), das Aktivitätslevel (Kapitel 2.3.1) und die Luftfeuchtigkeit. Diese psychometrischen Diagramme werden auf Grundlage der Wärmebilanzgleichung des PMV-Modells erstellt. Abbildung 2-2 zeigt die behaglichen Zonen (grau) in Form eines Parallelogramms je Bekleidungsset (1.0 clo und 0.5 clo).

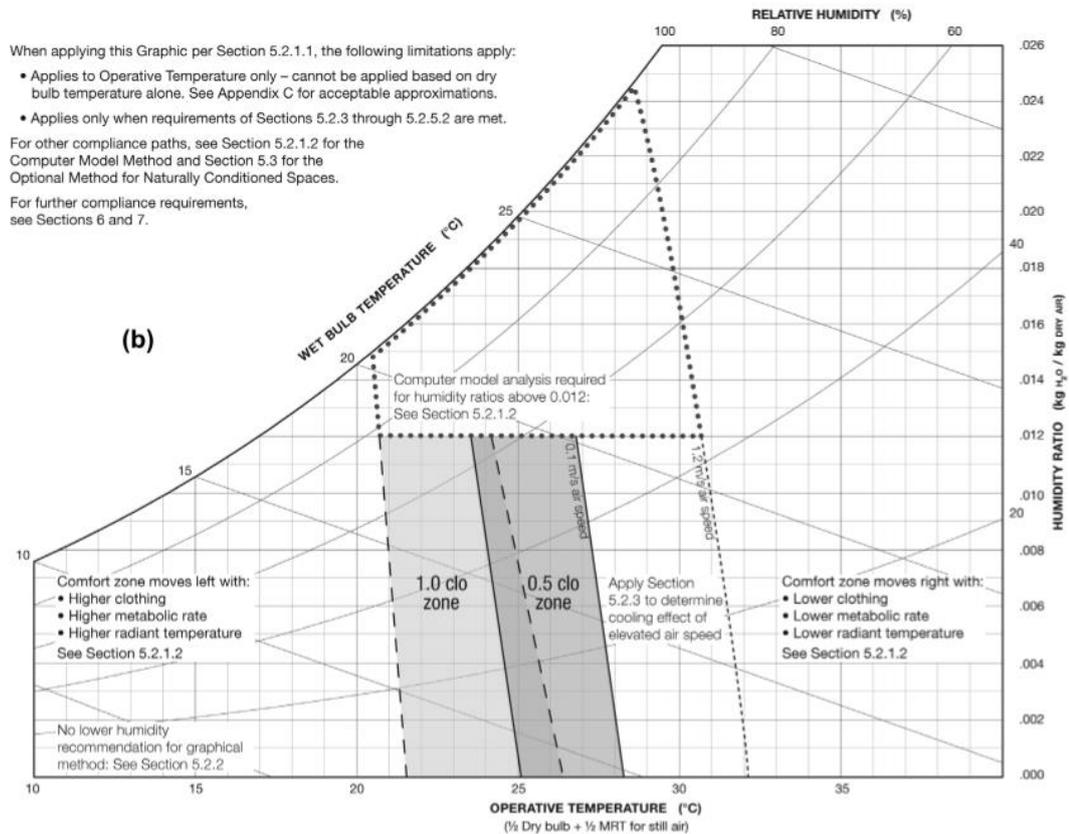


Abbildung 2-2: Ermittlung der behaglichen Zone für die beiden Bekleidungsfaktoren 0.5 clo (Winterbekleidung) und 1.0 clo (Sommerbekleidung) nach [18]

## Analytische Methode

Können die Grenzen für das Aktivitätslevel ( $1.0 < met < 1.3$ ) und die Bekleidung ( $0.5 < clo < 1.0$ ) nicht eingehalten werden, kann die grafische Methode nicht mehr angewendet werden. Hier müssen analytische Methoden angewendet werden.

In ASHRAE 55 wird dabei auf das „Thermal Comfort Tool for ASHRAE 55“ [19] verwiesen. Bei dem Online Tool können die Nutzer\*innen selbst die operative Temperatur, alternativ Lufttemperatur und mittlere Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit, Raumluftfeuchtigkeit und persönliche Parameter wie Aktivitätslevel und Bekleidung

wählen. Die Nutzer\*innen bestimmen, nach welchem Modell, PMV/PPD oder Adaptiver Ansatz die Behaglichkeit berechnet werden soll.

### Erhöhte Luftgeschwindigkeiten

Das „SET Model“ („Standard Effective temperature“) Modell (Kapitel 2.4.1) wird innerhalb des ASHRAE Thermal Comfort Tools verwendet, um auch Fälle mit höheren Luftgeschwindigkeiten > 0.2 m/s, einzubeziehen (Abbildung 2-3).

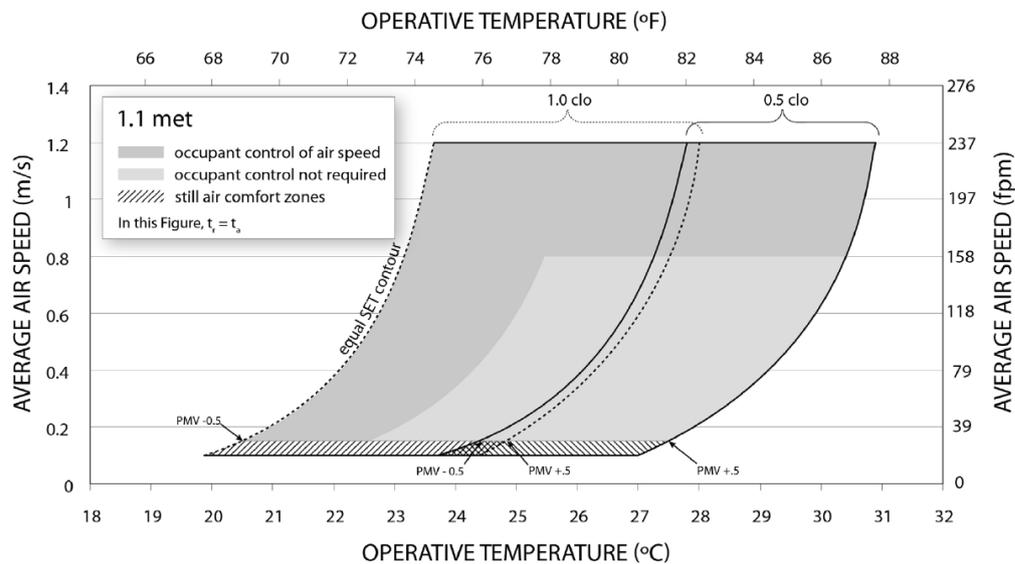


Abbildung 2-3: Behaglichkeitsfeld der operativen Temperatur und der durchschnittlichen Luftgeschwindigkeit für die beiden Bekleidungsfaktoren 0.5 clo (Winterbekleidung) und 1.0 clo (Sommerbekleidung) aus [20]

### Lokale thermische Unbehaglichkeiten und Temperaturänderungen pro Zeiteinheit

Beim ASHRAE Standard 55, wie auch bei DIN EN ISO 7730, werden lokale thermische Unbehaglichkeiten berücksichtigt, die durch Strahlungswärme auftreten können. Diese können sowohl durch Decken- und Fußbodenheizungen ausgelöst werden als auch durch Temperaturunterschiede zwischen Wandoberflächen und der Luft.

### Behaglichkeit in natürlich belüfteten Räumen

Der ASHRAE Standard erlaubt die Berechnung der thermischen Behaglichkeit in natürlich belüfteten Gebäuden, wenn folgende Kriterien vorliegen:

- Das Gebäude wird ohne mechanische Kühlung und ohne Heizsysteme betrieben,
- Das Aktivitätslevel muss zwischen 1,0 – 1,3 met liegen,
- Das Bekleidungslevel muss im Bereich zwischen 0,5 - 1,0 clo liegen und kann selbstständig durch die Gebäudenutzer\*innen angepasst werden,
- Die Außentemperatur liegt zwischen 10 °C bis 33,5 °C.

Folgende Diagramme zeigen das Adaptive Diagramm, wie es auch im ASHRAE 55 Comfort Tool gezeigt wird. Der Adaptive Ansatz, gezeigt in Abbildung 2-4, berücksichtigt die mittlere Außentemperatur und die operative Temperatur während Abbildung 2-5 auf Werten der Lufttemperatur (DB, engl. „Dry bulb temperature“) basiert.

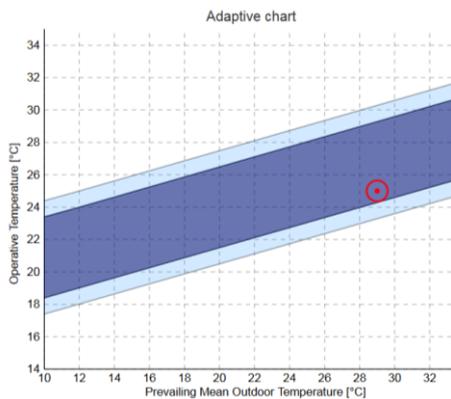


Abbildung 2-4: Adaptives Behaglichkeitsfeld nach ASHRAE 55 Thermal Comfort Tool [19]

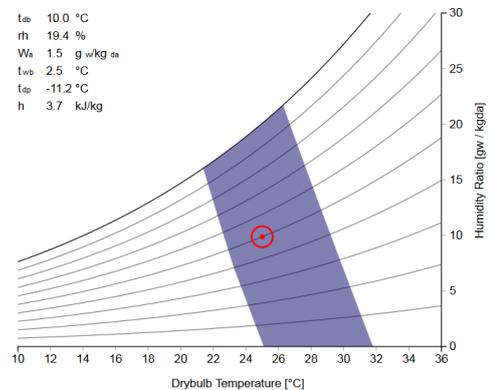


Abbildung 2-5: Diagramm der Behaglichkeitszone basierend auf der Lufttemperatur (DB) [19]

## 2.2 Einflussgrößen auf die thermische Behaglichkeit

Die thermische Behaglichkeit wird von persönlichen Faktoren wie Aktivitätslevel/ Stoffwechselrate (met), Bekleidungsfaktor (clo), Alter und Adaption und Akklimatisation an die thermische Umgebung bestimmt. Weiterhin haben die (hygro)thermischen Eigenschaften wie Raumluft-, Oberflächentemperatur, Luftgeschwindigkeit und -feuchtigkeit und die Solarstrahlung Einfluss auf die thermische Behaglichkeit des Menschen.

### 2.2.1 Raumlufttemperatur

Die Raumlufttemperatur spielt eine wichtige Rolle bei der Wärmebilanzierung des Menschen. Die Verteilung der Wärmeabgabe unterscheidet sich je nach Verhältnis zwischen Wärmestrahlung und Raumlufttemperatur (Abbildung 2-6).

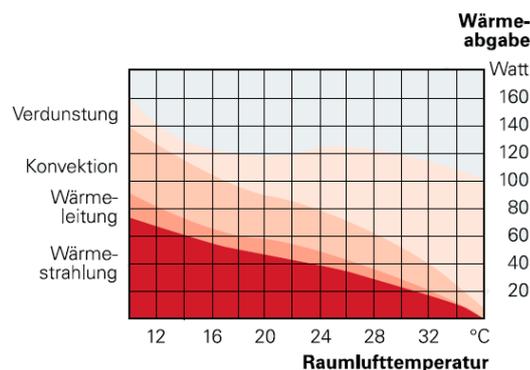


Abbildung 2-6: Wärmeverlust eines sitzenden Menschen aus [21]

Bei niedrigen Raumlufthtemperaturen wird ein Großteil der menschlichen Wärme über Wärmestrahlung abgegeben. Bei hohen Raumlufthtemperaturen überwiegt die Wärmeabgabe über Verdunstung (Abbildung 2-6).

### 2.2.2 Oberflächentemperatur

Die Oberflächentemperaturen eines Raumes bestimmen die Strahlungstemperaturen, die einen hohen Einfluss auf das thermische Empfinden haben. Gemäß dem Stefan-Boltzmann-Gesetz gibt jeder Körper, dessen Temperatur größer als der absolute Nullpunkt ist, Wärmestrahlung an die Umgebung ab. Dies wird in der folgenden Gleichung beschrieben:

$$P = \sigma * A * T^4 \quad (2-6)$$

Sie beschreibt die Strahlungsleistung P, die ein schwarzer Körper mit der Fläche A und der absoluten Temperatur T unter Berücksichtigung der Stefan-Boltzmann-Konstante  $\sigma$  mit  $(5,67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4})$  abgibt.

Bei der Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur werden die Oberflächentemperaturen und die Sichtfaktoren, also das geometrische Sichtverhältnis zwischen Person und Oberfläche gewichtet.

In dieser Arbeit wird für die mittlere Strahlungstemperatur auch der englische Begriff „Mean Radiant Temperature“ MRT genutzt. Die mittlere Strahlungstemperatur ( $\bar{T}_r$ ) berechnet sich somit aus den Oberflächentemperaturen ( $T_N$ ) der umgebenden Flächen (N) und den Sichtfaktoren ( $F_{p-N}$ ) zwischen diesen Flächen und dem Menschen mit der folgenden Gleichung:

$$\bar{T}_r^4 = T_1^4 F_{p-1} + T_2^4 F_{p-2} + \dots + T_N^4 F_{p-N} \quad (2-7)$$

Zur Berechnung der Sichtfaktoren werden Programme verwendet, die die Sichtfaktoren mittels geeigneter Verfahren wie dem „Raytracing“ (Strahlungsverfolgung) oder nach der Analytischen Methode berechnen (siehe Kapitel 5.3.2).

### 2.2.3 Luftgeschwindigkeit

Die Luftgeschwindigkeit bestimmt den konvektiven Wärmeübergang zwischen dem Menschen und dessen Umgebung und beeinflusst in einem hohen Maße die thermische Behaglichkeit.

Dies kann bei lokalen Behaglichkeitsbetrachtungen von großer Bedeutung sein, denn sie kann dazu genutzt werden, höhere Raumlufthtemperaturen zuzulassen, damit ein bestimmtes thermisches Behaglichkeitslevel gehalten wird. Eine höhere Luftgeschwindigkeit kann durch natürliche Belüftung oder durch dezentrale und zentrale Systeme zur (lokalen) Belüftung erreicht werden.

Abbildung 2-7 zeigt die Wirksamkeit der mittleren Luftgeschwindigkeit  $\bar{v}$  [m/s] im Verhältnis zu steigenden Temperaturen  $\Delta t$  [°C] ab 26 °C.

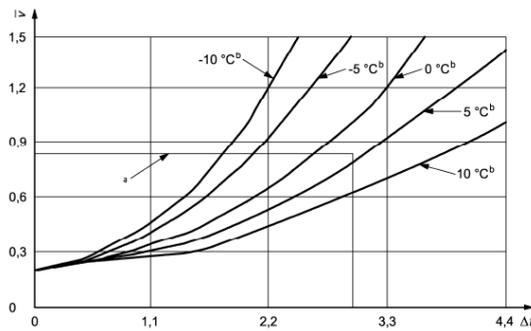


Abbildung 2-7: Erforderliche Luftgeschwindigkeit, um eine erhöhte Temperatur auszugleichen, für leichte, überwiegend sitzende Tätigkeit sollte  $\Delta t < 3^\circ\text{C}$  und  $\bar{v} < 0,82 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  sein, aus [14]

Die Kurven betrachten das Verhältnis  $\bar{t}_r - t_a$  von Strahlungstemperatur ( $\bar{t}_r$ ) und Raumlufthtemperatur ( $t_a$ ).

$\bar{t}_r$  und  $t_a$  erhöhen sich gleichmäßig. Die Grafik zeigt, dass die mittlere Strahlungstemperatur höher als die Raumlufthtemperatur sein sollte, damit eine erhöhte Luftgeschwindigkeit ihre Wirkung erzielen kann. „a“ beschreibt die Grenze für leichte, überwiegend sitzende Tätigkeiten [14].

### Behaglichkeitsfeld mit Einfluss der relativen Luftgeschwindigkeit und Bekleidung

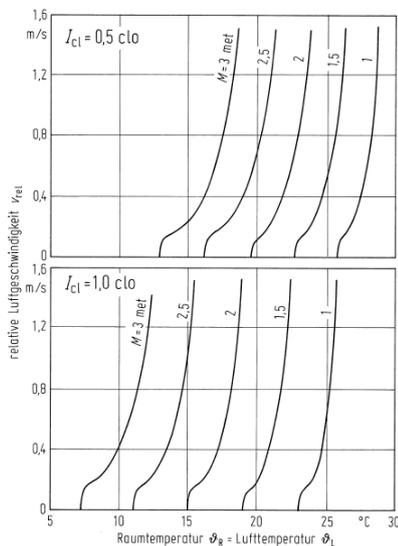


Abbildung 2-8: Behaglichkeitsdiagramm, das den Einfluss der relativen Luftgeschwindigkeit auf die optimale Raumtemperatur, in Abhängigkeit der Bekleidung (Sommerkleidung 0.5 clo, Winterkleidung 1.0 clo) zeigt, aus [22]

Die als behaglich empfundene Luftgeschwindigkeit ist stark abhängig von der körperlichen Aktivität sowie dem Bekleidungskoeffizienten ( $I_{cl}$ ) des Menschen (Abbildung 2-8).

Abbildung 2-8 zeigt die Abhängigkeit zwischen der relativen Luftgeschwindigkeit (y-Achse) und der Lufttemperatur (x-Achse) und ihrem Einfluss auf die Behaglichkeit. Mit steigender Lufttemperatur wird eine zunehmende Luftgeschwindigkeit als angenehm empfunden. Aktivitätslevel und Bekleidung sind weitere Beeinflussungsfaktoren.

Luftgeschwindigkeit als angenehm empfunden. Aktivitätslevel und Bekleidung sind weitere Beeinflussungsfaktoren.

### Behaglichkeitsfeld in Abhängigkeit der mittleren Oberflächentemperatur und Raumlufthtemperatur

Die folgenden Abbildungen zeigen die Abhängigkeit zwischen mittlerer Oberflächentemperatur und der Raumlufthtemperatur. In Abbildung 2-9 sind Behaglichkeitsfelder markiert. Bei steigender Raumlufthtemperatur (beispielsweise bei 24 °C) kann bei einer mittleren Oberflächentemperatur unter 25 °C noch ein behaglicher Zustand erreicht werden, während bei einer Oberflächentemperatur über 25 °C unbehaglich warme Zustände vorliegen.

Abbildung 2-10 zeigt die Abhängigkeit der Aktivität und der Bekleidung auf die thermische Behaglichkeit. Bei zunehmender Aktivität und Bekleidung kann die als

behaglich empfundene Raumtemperatur reduziert werden (siehe Kurve 1 bis Kurve 3). Kurve 1 repräsentiert einen sitzenden Menschen mit mittlerem Bekleidungslevel, der sich mit einer mittleren Oberflächentemperatur von 20 °C und einer Raumlufttemperatur von 26 °C behaglich fühlt. Bei zunehmender Aktivität und leichter Bekleidung (Kurve 2) genügt eine Raumlufttemperatur von 21 °C, um ein behagliches Level zu erreichen, während bei gleichbleibender Aktivität und zunehmendem Bekleidungslevel (Kurve 3) sogar eine Raumlufttemperatur von nur 13 °C ausreichend ist.

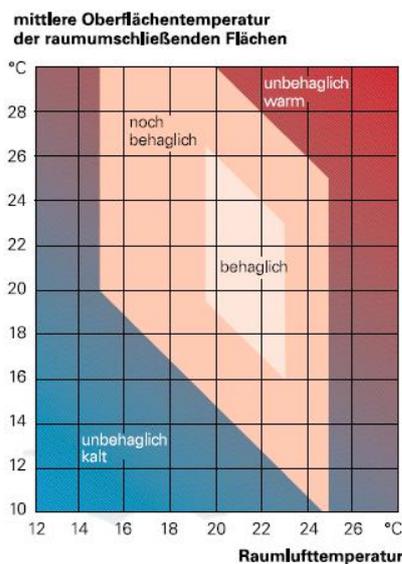


Abbildung 2-9: "Thermische Behaglichkeit bei sitzender Beschäftigung und mittlerer Aktivität", aus [21, 23]

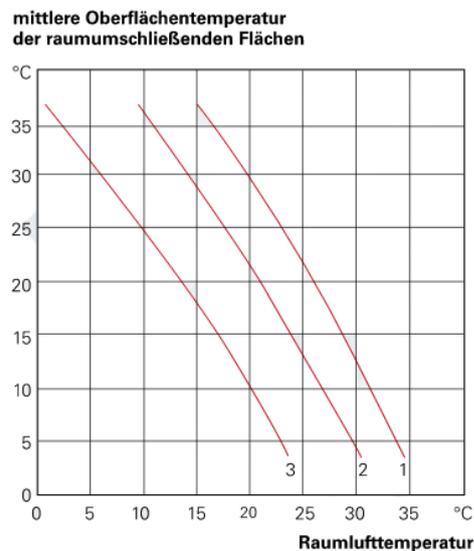


Abbildung 2-10: "Einfluss von Aktivität und Bekleidung auf die Behaglichkeit" aus [21]

## 2.2.4 Raumluftfeuchtigkeit

Die Luftfeuchtigkeit hat ebenfalls einen Einfluss auf das Behaglichkeitsempfinden. Eine zu geringe Luftfeuchtigkeit bewirkt ein Trockenheitsgefühl der Augen und der Schleimhäute, während eine zu hohe Luftfeuchtigkeit die Schweißabgabe behindern kann. Die absolute Luftfeuchtigkeit wird als diejenige Wassermenge in Gramm beschrieben, die in einem Kilogramm Luft vorhanden ist. Von den Menschen wird die relative Luftfeuchtigkeit  $\varphi$  wahrgenommen. Diese sagt aus, wie groß die Wasserdampfmenge  $x$  bei einer bestimmten Temperatur im Verhältnis zur Sättigungsdampfmenge  $x_s$  ist [24].

$$\varphi = \frac{x}{x_s} * 100\% \quad (2-8)$$

Für Aufenthaltsräume wird ein Bereich zwischen 30 % bis zu 65 % relativer Luftfeuchte empfohlen [25]. Der Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf das Wärmeempfinden ist dann relativ gering, wenn die Temperaturen unter 26 °C und das Aktivitätslevel unter 2 met (Kapitel 2.3.1) liegen [14]. Der Luftzustand wird durch die Lufttemperatur, Druckverhältnisse und den Feuchtigkeitsgehalt bestimmt [26]. Das Verhältnis dieser

Parameter zueinander kann mithilfe des h-x-Diagramms von Mollier (Abbildung 2-11) bestimmt werden. Es zeigt die Temperatur  $T$ , die Enthalpie  $h$  auf 1 kg trockene Luft und die relative Feuchte  $\varphi$  über der absoluten Feuchte  $x$  (Wassergehalt der Luft).

Liegt die relative Luftfeuchtigkeit bei 100 % kann die Luft keine Feuchtigkeit mehr aufnehmen, sie ist sozusagen „gesättigt“. Diese Sättigungslinie repräsentiert im h-x-Diagramm (Abbildung 2-11) die untere Kurve. Die Klimatisierungsprozesse wie Heizen, Kühlen, Be- und Entfeuchten können im h-x-Diagramm dargestellt werden. Eine Temperaturänderung bei gleichbleibender absoluter Feuchte führt zu einer Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit. Beim Heizen wird die relative Luftfeuchtigkeit minimiert [26].

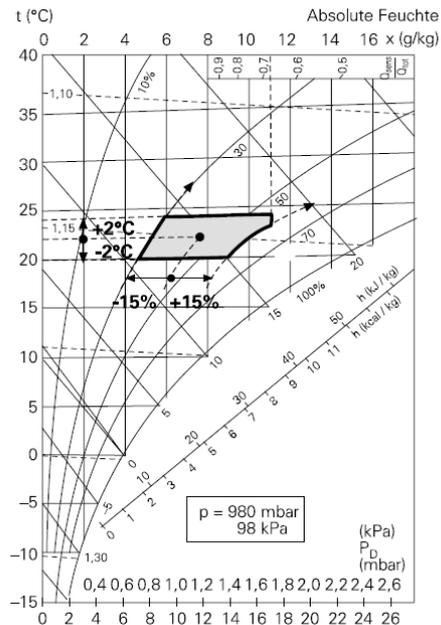


Abbildung 2-11: h-x-Diagramm nach Mollier, definiertes Behaglichkeitsfeld nach [24]

Behaglichkeitsfeld in Abhängigkeit von Raumluftfeuchte und Raumtemperatur

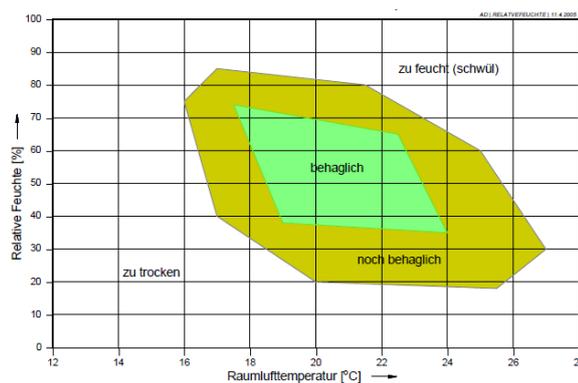


Abbildung 2-12: Behaglichkeitsfeld der Raumluftfeuchte und Raumlufttemperatur nach Frank [23], aus [21]

Abbildung 2-12 zeigt die Abhängigkeiten zwischen relativer Raumluftfeuchte und der Raumlufttemperatur in Form eines behaglichen Feldes [23].

## 2.2.5 Solarstrahlung

Die Solarstrahlung tritt als direkte, diffuse oder reflektierte kurzwellige Strahlung auf. Bauteile und Menschen können die kurzwellige Strahlung absorbieren, aber nicht emittieren.

Die Solarstrahlung beeinflusst den Wärmehaushalt des Menschen über zwei Wege. Sie erwärmt Oberflächen, die die kurzwellige Solarstrahlung in langwellige Wärmestrahlung umwandeln und über langwelligen Strahlungsaustausch an den Menschen abgeben. Zum anderen kann sie als direkte kurzwellige Solarstrahlung durch direkte Einwirkung auf lokale Körperteile Behagen oder Unbehagen bewirken. In der Gebäudesimulation wird die Solarstrahlung über Solarstrahlungsmodelle berücksichtigt. In ESP-r ist es standardmäßig das „Perez All-Weather-Sky-Model“.

## 2.3 Physiologie-Modelle des Menschen

### 2.3.1 Grundlagen thermophysiologischer Vorgänge im Körper

Der Mensch steht im ständigen Wärmeaustausch mit seiner thermischen Umgebung. Der Wärmeaustausch erfolgt über Konvektion (Wärmeaustausch über ein flüssiges oder gasförmiges Medium), langwellige Wärmestrahlung, Wärmeleitung (Wärmeaustausch in einem festen Medium) und Evaporation (Verdunstung von Flüssigkeit an der Hautoberfläche) [27].

Um eine konstante Körperkerntemperatur (zwischen 36 °C bis 38 °C) im Körper zu halten, übernimmt der Hypothalamus als thermisches Kontrollzentrum die Wärmeregulation des Körpers [28].

Die menschliche Haut spielt eine große Rolle bei der Wärmeregulation. Zum einen befinden sich in der Haut Nervenenden, die Thermorezeptoren, die die Signale zur Ermittlung des thermischen Empfindens an den Hypothalamus senden. Zum anderen wirkt sie auch bei der direkten thermischen Regulation, zum Beispiel durch Aufrechterhalten der Haare bei „Gänsehaut“ und durch Erweiterung (Vasodilatation) oder Zusammenziehen der Blutgefäße (Vasokonstriktion) in der äußeren Körperschicht mit [27].

#### Thermorezeptoren

Die in der Haut liegenden Thermorezeptoren nehmen die Temperaturänderungen wahr und senden diese als Signale an den Hypothalamus. Bei Stimulierung der Nervenenden werden diese Signale als thermisches Empfinden wahrgenommen. Der Körper nimmt die Umgebungstemperatur in unterschiedlichen Differenzierungen und Änderungsrichtungen wahr. Dies wird durch die verschiedenen Rezeptortypen – kalte, warme und Schmerzrezeptoren (sehr kalt, sehr heiß) ermöglicht.

Bei sehr kalten Umgebungstemperaturen, welche als schmerzhaft kalt empfunden werden, reagieren nur die Schmerzrezeptoren und nicht die Kalt-Rezeptoren. Die Rezeptoren können sich anpassen. Erfolgt ein abrupter Temperaturwechsel, werden die

Rezeptoren in einem ersten Schritt stark stimuliert und im Anschluss daran flacht diese Stimulation ab [27].

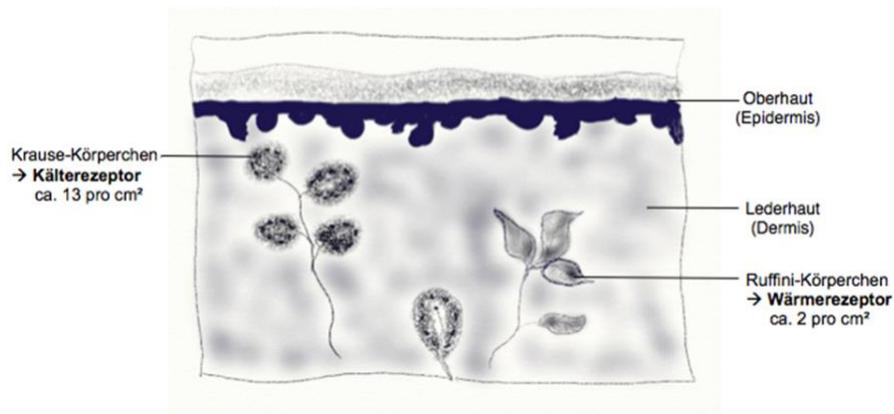


Abbildung 2-13: Kalt- und Warmrezeptoren aus [29]

### Metabolische Wärmeregulation

Der Körper produziert ständig metabolische Wärme. Zum einen erfolgt die Wärmeproduktion durch die Nahrungsaufnahme und zum anderen über den aktivierten Stoffwechsel durch Muskelbewegung bei erhöhter Aktivität [30].

Um die physiologischen Vorgänge des Körpers simulieren zu können, ist es notwendig, das metabolische Äquivalent (Met) des Menschen zu bestimmen. Dies dient dazu, den Energieverbrauch unterschiedlicher Aktivitäten zu vergleichen. Der Grundumsatz eines durchschnittlichen Menschen mit einer Hautoberfläche von  $1,8 \text{ m}^2$  in völliger Ruhe liegt bei circa 0,8 met. 1 met entspricht  $58 \text{ W/m}^2$  [31]. Der Grundumsatz ist als die Energiemenge gekennzeichnet, die der Körper bei völliger Ruhe bei vorliegender Indifferenztemperatur und nüchtern pro Tag zur Aufrechterhaltung seiner Funktionen benötigt [32].

Der Grundumsatz erhöht sich mit zunehmender körperlicher Aktivität. Typische Büroaktivitäten, wie in dieser Arbeit betrachtet, liegen im Bereich von 1,0 bis 1,2 met. Tabelle 2-2 zeigt einige Aktivitäten mit ihren metabolischen Raten und dem äquivalenten Energieverbrauch.

Tabelle 2-2: Aktivitäten und entsprechende Werte für das metabolische Äquivalent (met) aus [20]

Aktivität	Met Rate	
	Met	$\text{W/m}^2$
Entspannt, zurückgelehnt Sitzen	0,8	45
Ruhig Sitzen und Lesen	1,0	55
Sitzen und Schreiben	1,0	60
Sitzen und Tippen	1,1	65
Sitzend Abheften	1,2	70
Laufen 0,9 m/s, 3,2 km/h	2,0	115

### Postprandiale Thermogenese

Die postprandiale Thermogenese ergibt sich aus der durch die Nahrungsaufnahme resultierenden Stoffwechsellaktivität. Sie beeinflusst die Thermoregulation des Menschen [30]. Die entstehende Wärme wird als ein Endprodukt des Stoffwechselprozesses angesehen. Sie ist abhängig von der Art der Zusammensetzung der Nahrung (Zucker, EiweiÙe, Fette) [30].

### Intrinsische Thermoregulation

Der menschliche Körper hat im Normalzustand eine Körperkerntemperatur von 37 °C. Um diese Temperatur konstant zu halten, muss ständig neue Wärme erzeugt werden.

Wärme im Körper kann durch erhöhte Muskelaktivität (Bewegung, Zittern) erzeugt werden. Gemäß dem Hauptsatz der Thermodynamik fließt die Wärme von warmer zu kalter Umgebung, wodurch im Körper häufig ein Temperaturgefälle vom Körperinneren zur Körperoberfläche entsteht. Von der Hautoberfläche kann Wärme über Konvektion, Wärmeleitung und über Strahlungsaustausch abgegeben oder aufgenommen werden [27].

Der Hypothalamus reguliert über Rückkopplung der Thermorezeptoren die notwendigen Temperaturanpassungen. Die Wärmeregulation im Körper ist abhängig von den Umgebungsbedingungen und den jeweiligen Haut- und Kerntemperaturen. Die aktuellen Haut- und Kerntemperaturen werden stets mit den jeweiligen Schwellenwerten verglichen und die entsprechenden Temperaturregelungsmechanismen durch den Hypothalamus initiiert [27].

Durch GefäÙerweiterung (Vasodilatation) und GefäÙverengung (Vasokonstriktion) wird die Wärmeabgabe der Hautoberfläche erhöht oder reduziert. Durch die Erweiterung der BlutgefäÙe an der Hautoberfläche steigt der Blutdurchfluss und in der Zeit wird eine größere Menge an Wärme über die Haut nach außen abgeleitet (Abbildung 2-14) [27].

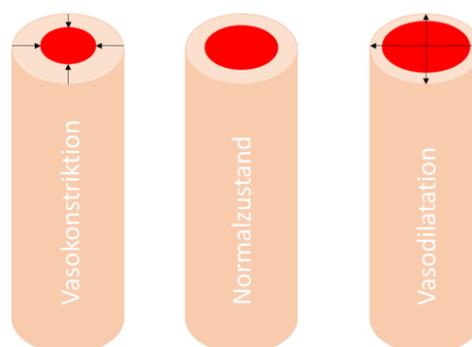


Abbildung 2-14: Vasokonstriktion und Vasodilatation

Vasokonstriktion beschreibt den Prozess der GefäÙverengung (Abbildung 2-14). Die BlutgefäÙe ziehen sich zusammen. Damit wird in den BlutgefäÙen der Hautoberfläche die Durchflussmenge reduziert. Die Wärmeabgabe an der Hautoberfläche wird durch diesen Prozess vermindert [27].

Reicht die Gefäßregulierung nicht mehr aus, kommen weitere Regelungsmechanismen wie Schwitzen und Zittern zum Einsatz. Bei kalten Umgebungsbedingungen erhöht der Körper durch Zittern (erhöhte Muskelaktivität) die metabolische Wärmeproduktion in den Muskeln. Bei warmen (höheren) Umgebungsbedingungen erfolgt die Wärmeabgabe über die Haut durch Schwitzen (Wärmeverluste durch Evaporation). Die auf der Haut befindliche Feuchtigkeit wechselt vom flüssigen in den gasförmigen Zustand und nimmt dabei Energie auf, die dann als Wärme an die Umgebung abgegeben wird [27].

Fällt die Körperkerntemperatur extrem, wird die Temperatur peripherer Körperteile zur Vermeidung eines größeren Wärmeverlustes gesenkt. Dabei hat das periphere Blut, welches in Arme und Beine gepumpt wird, eine niedrigere Temperatur als das Blut, welches die überlebensnotwendigen Organe (unter anderem Herz, Lunge, Gehirn) versorgt [33].

### Thermoregulation durch Kleidung

Die Bekleidung stellt einen wichtigen Faktor in der Wärmebilanz dar. Sie soll ein Gleichgewicht zwischen Wärmedurchlass und Wärmerückhalt bilden, sodass es nicht zum Wärmestau auf der Körperoberfläche kommt.

### Wärmeleitwiderstand (clo) und Bekleidungsflächenfaktor (f<sub>cl</sub>)

Bei der Berechnung der Wärmebilanzgleichung als Maß des Gleichgewichts von im Körper produzierter und abgeführter Energie muss die Bekleidung beachtet werden. Die Bedeutung der Bekleidung wird unter anderem durch den Wärmeleitwiderstand (clo) in m<sup>2</sup>K/W definiert.

Eine unbedeckte Person weist einen Wärmeleitwiderstand von 0 clo auf. Die Werte des Bekleidungs faktors können mithilfe von Tabellen beispielsweise in ASHRAE [12], abgelesen oder berechnet werden. Typische Werte für einen bekleideten Menschen im Innenbereich mit Sommerkleidung sind 0,5 clo und für einen Menschen mit Winterbekleidung für den Innenbereich 1,0 clo.

Bei Beachtung der Bekleidung spielt auch der Bekleidungsflächen-Faktor (f<sub>cl</sub>) eine Rolle. Zur Berechnung kann die fotografische Methode verwendet werden [34]. Hierbei wird ein Manikin aus drei verschiedenen Horizontalwinkeln und zwei Höhenwinkeln (0 °C und 60 °C) abgelichtet. Im nächsten Schritt wird der projizierte Oberflächenbereich des Manikin mithilfe eines Planimeters gemessen. Der Bekleidungsflächenfaktor f<sub>cl</sub> wird mit dem projizierten Oberflächenbereich des bekleideten Manikins A<sub>cl</sub> und des unbedeckten Manikins A<sub>n</sub> nach der folgenden Formel ermittelt:

$$f_{cl} = \frac{\sum A_{cli}}{\sum A_{ni}} \quad (2-9)$$

Die Ermittlung ist aufwendig, weswegen Tabellen zum Ablesen typischer f<sub>cl</sub> Werte empfohlen werden [34].

Gewöhnlich wird die Oberfläche eines unbedeckten Manikins mit der Formel nach „DuBois“ bestimmt [35]. Vereinfacht kann die Oberfläche eines durchschnittlichen

Menschen mit  $A_D = 1,8 \text{ m}^2$  angenommen werden [36], aber auch anhand der Körpermasse  $m$  [kg] und der Körperhöhe  $l$  [m] mit der folgenden Gleichung berechnet werden.

$$A_D = 0.202m^{0.425}l^{0.725} \quad (2-10)$$

#### I<sub>cl</sub> – “intrinsische” Bekleidungsisolation

$I_{cl}$  stellt die intrinsische Bekleidungsisolation dar.  $I_{cl}$  wird mit dem Wert der thermischen Bekleidungsisolation  $I_t$  und  $I_a$ , der Isolation der Grenzluftschicht zwischen Bekleidung und Hautoberfläche sowie dem Bekleidungsflächenfaktor  $f_{cl}$ , berechnet (Gleichung 2-11) [37].

$$I_{cl} = I_t - \left( \frac{I_a}{f_{cl}} \right) \quad (2-11)$$

#### Feuchtigkeits-Permeabilitätsindex der Bekleidung ( $i_{cl}$ )

Der Feuchtigkeits-Permeabilitätsindex der Bekleidung ( $i_{cl}$ ) wurde von Woodcock [38] eingeführt. Er beschreibt die Verdunstungswärmeübertragung der Hautoberfläche durch die Kleidung. Die Berechnung des Feuchtigkeits-Permeabilitätsindex erfolgt nach Woodcock [8, 38]:

$$i_{cl} = \frac{\frac{R_{cl}}{R_{e,cl}}}{LR} \quad (2-12)$$

LR beschreibt den Lewis Faktor, der für Innenraumbedingungen mit einem konstanten Wert von 16,5 K/kPa angegeben wird [39]. Weiterhin werden der Wärmedämmwiderstand der Bekleidung ( $R_{cl}$ ) und der Widerstand gegen Verdunstungswärmeübertragung durch die Kleidung ( $R_{e,cl}$ ) berücksichtigt. Der Feuchtigkeits-Permeabilitätsindex ( $i_{cl}$ ) kann mit einem Wert von 0,4 angenommen werden [39]. Ein Wert von 0 steht für undurchlässige und ein Wert von 1 für komplett durchlässige Kleidung.

#### Wärmebilanzgleichung des menschlichen Körpers

Die Wärmebilanzgleichung stellt das Gleichgewicht der menschlichen Wärmeregulation mit den Umgebungsbedingungen dar [35]:

$$M - W = (C + R + E_{sk}) + (C_{res} + E_{res}) + (S_{sk} + S_{cr}) \quad (2-13)$$

Die metabolische Rate  $M$  setzt sich aus der metabolischen Aktivität durch Bewegung  $M_{act}$  und durch Zittern  $M_{shiv}$  zusammen.  $W$  stellt die mechanische Arbeit oder Bewegung dar, sodass  $M-W$  die produzierte Nettowärme darstellt. Diese soll im Gleichgewicht zu den Wärmeverlusten der Haut stehen.

Die Wärmeverluste der Haut setzen sich aus sensiblen, den fühlbaren Wärmeverlusten und aus den latenten Verlusten in Form von Evaporation zusammen. Die Wärme wird bei der Verdunstung im Wasserdampf gebunden.

Folgende Faktoren werden bei der Berechnung der Wärmegleichung berücksichtigt:

$C + R$	Sensible Wärmeverluste der Hautschicht [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
$E_{sk}$	Evaporative Wärmeverluste der Hautschicht [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
$C_{res}$	Konvektive Wärmeverluste durch Atmung [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
$E_{res}$	Evaporative Wärmeverluste durch Atmung [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
$S_{sk}$	Wärmespeicherrate der Hautschicht [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
$S_{cr}$	Wärmespeicherrate der Kernschicht [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

Die Wärmeverluste der Haut sind je nach vorliegender Kleidung zu berechnen. Die Kleidung hat einen großen Einfluss auf die Wärmeverluste der Haut, die sich aus der thermischen Speicherfähigkeit und ihrer Feuchtigkeitspermeabilität ergeben.

### 2.3.2 Historische Entwicklung

Schon im Altertum beschäftigten sich die Menschen mit den physiologischen Vorgängen im Menschen.

*"Since Antiquity, more or less complex theories have been developed to identify the essential functions responsible for life (e.g respiration, heart, blood). Hippocrates believed that blood was warm at a fixed temperature by divine will, whereas Plato concluded that blood circulation was due to a fire diffusion."* [40]

Die ersten Entwicklungen, die einen Grundstein für thermo-physiologische Modelle legten, begannen schon zu Beginn des 16. Jahrhunderts mit den Studien von Sanctorio. Er nutzte als einer der ersten ein physikalisches Messinstrument in der Medizin. Mittels einer von ihm konstruierten „Stoffwechselwaage“ bestätigte er die Existenz von „perspiratio insensibilis“ der Wasserabgabe über die Haut durch Diffusion [40] [41].

Die ersten mathematischen thermophysiologischen Modelle wurden Anfang des 20. Jahrhunderts eingeführt. 1941 erstellte Burton ein Modell, mit dessen Hilfe er die thermischen physiologischen Reaktionen des Körpers simulierte [42]. Die Berechnungen erfolgten wie bei später eingeführten Physiologie-Modellen auch über den Vergleich aktueller Körpertemperaturen mit den Sollwerttemperaturen.

Im selben Jahr publizierte Gagge's Team, die J.B Pierce Laboratory Group, eine Studie zu den meistgenutzten Einheiten für den Stoffwechselgrundumsatz (met) und den Bekleidungsfaktor (clo) in Physiologie-Modellen [43].

Über die Jahre erfolgte eine Weiterentwicklung der Physiologie-Modelle von Ein-Knoten über Zwei-Knoten und Mehrknoten-Modellen hin zu Mehrsegment-Modellen [44]. Die Modelle unterscheiden sich in der Detailgenauigkeit in der Anzahl der Körperteile, Körperschichten und des dargestellten Gewebes.

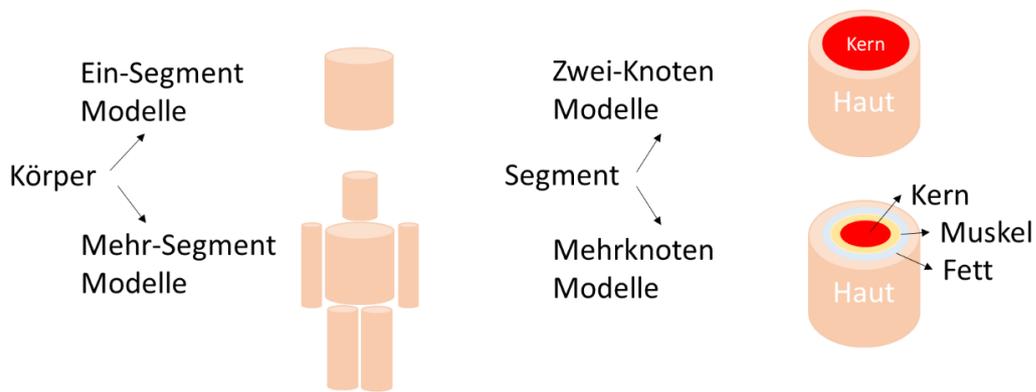


Abbildung 2-15: Vom Ein-Segment zum Mehrknotenmodell, angepasst aus [44]

### Ein-Knoten-Modelle

Ein-Knoten-Modelle (siehe Abbildung 2-15) berücksichtigen keine thermophysiological Prozesse im Körper. Die Modelle liefern vorausgesagte thermische Reaktionen des Körpers, die als Ergebnisse während experimenteller Studien gesammelt wurden.

Eines der ersten Ein-Knoten-Modelle ist das von Givoni und Goldmann [45][46], welches die metabolische Wärmeproduktion des Körpers unter Bewegung berechnet. Zur Erstellung des Modells wurden Versuche mit unterschiedlichen metabolischen Aktivitätsleveln durchgeführt und eine Formel zur Berechnung der metabolischen Wärmeproduktion erstellt. Bei den Studien wurden auch Effekte wie das Tragen eines zusätzlichen Gewichts in unterschiedlichen Körperhöhen (beispielsweise auf den Füßen, in der Körpermitte, in den Händen) berücksichtigt.

### Zwei-Knoten-Modelle

Zwei-Knoten-Modelle berücksichtigen Wärmebilanzgleichungen für die Kernschicht und die Hautschicht. Die Temperaturen der zwei Schichten werden jeweils in sich als homogen behandelt und es erfolgt keine weitere Unterteilung in zusätzliche Schichten, Organe oder Körperteile. Ein bekanntes Zwei-Knoten-Modell ist das von Gagge [47].

### Zwei-Knoten-Modell von Gagge

Das Zwei-Knoten-Modell [43][47, 48] besteht aus zwei konzentrischen Zylindern, einer Kern- und einer Hautschicht.

Das Modell repräsentiert den Körper mittels eines aktiven Kontrollzentrums und eines passiven, ausführenden Systems. Das Physiologie-Modell simuliert den Wärmefluss zwischen den zwei Schichten (Kern-Haut) wie auch den Wärmefluss der äußeren Hautschicht mit der Umgebung.

Für beide Schichten gilt je eine Gleichung, welche die Wärmespeicherrate wie auch die jeweilige Temperaturänderung pro Schicht über die Zeit berücksichtigt [35]:

$$S_{cr} = \frac{(1 - \alpha_{sk})mc_{p,b}}{A_D} * \frac{dt_{cr}}{d\theta} \quad (2-14)$$

$$S_{sk} = \frac{\alpha_{sk}mc_{p,b}}{A_D} * \frac{dt_{sk}}{d\theta} \quad (2-15)$$

In die Berechnung der Wärmespeicherrate fließen die anteilige Masse der Hautschicht  $\alpha_{sk}$ , die Körpermasse  $m$ , die spezifische Wärmekapazität des Körpers  $c_{p,b}$ , die DuBois Oberfläche des Körpers  $A_D$ , die Temperatur der Kernschicht  $t_{cr}$  oder die Temperatur der Hautschicht  $t_{sk}$  sowie die Zeit  $\theta$  mit ein.

Die Wärmespeicherrate wird zur Berechnung der Wärmebilanzgleichung benötigt.

Das Zwei-Knoten-Modell kann die physiologischen Reaktionen für transiente Umgebungsbedingungen bei niedrigem bis mäßigem Aktivitätslevel vorhersagen. Wärme wird im Körperkern produziert, zusätzlich wird bei kalten Bedingungen Wärme durch Zittern und Muskelarbeit produziert. Dies wird beim Abgleich der aktuellen Haut- und Kerntemperaturen im Vergleich der Sollwert-Temperaturen berücksichtigt.

Die berechneten Werte des Gagge Physiologie-Modells können im weiteren Verlauf zur Berechnung von TSENS und DISC zur Berechnung der thermischen Behaglichkeit berücksichtigt werden (siehe Kapitel 2.4).

### Mehrknotten Modelle

Die Entwicklung der Mehrknotten-Modelle war ein wichtiger Schritt zur detaillierteren Betrachtung von Physiologie-Modellen. Hierbei soll vor allem das Modell von Stolwijk erwähnt werden, welches den Grundstein für eine Vielzahl weiterer Modelle legte.

### Stolwijk-Modell

Einen wichtigen Beitrag in der Entwicklung von Physiologie-Modellen leistete 1971 Stolwijk mit dem Mehrknotten-Modell, welches er für die NASA entwickelte [49]. Das Stolwijk Modell zeichnet sich dadurch aus, dass der Körper in 6 Körperteile (Kopf, Rumpf, Arme, Hände, Beine und Füße) und jeder dieser Körperteile wiederum in 4 Schichten (Kern, Muskel, Fett, Haut) unterteilt ist. Die einzelnen Körperteile und Schichten plus das Blut werden mit insgesamt 25 Knoten berücksichtigt.

Das 25-Knoten-Modell besitzt ein aktives Kontrollzentrum und ein passives ausführendes System. Der Wärmeaustausch zwischen dem Blutknoten und den Schichten erfolgt über Konvektion. Der Wärmeaustausch innerhalb der Körpersegmente von einer Schicht zur benachbarten erfolgt über Wärmeleitung.

Das aktive System kann in drei Phasen mit unterschiedlichen Aufgabenbereichen unterteilt werden. Die erste Phase dient dazu, den thermischen Zustand der Körpersegmente mithilfe der Thermorezeptoren zu erfassen. Die Informationen über den thermischen Zustand werden an den zweiten Teil des Kontrollmechanismus, den Hypothalamus weitergegeben, dort verarbeitet und als Signale weitergeleitet. In der

letzten Phase werden die Signale erfasst, umgesetzt und in der Simulation in Form von Schwitzen, Zittern, Vasodilatation, Vasokonstriktion ausgeführt [44, 49].

Der passive Teil stellt den menschlichen Körper mit den 6 Körperteilen und 4 Schichten dar. Das Stolwijk-Modell diente als Grundlage für weitere Mehrknoten-Modelle, die dem aktuellen Stand der heutigen Technik entsprechen [50–52].

### IESD-Fiala Model

Das IESD-Fiala Modell (Institute of Energy and Sustainable Development (IESD)) baut auf verschiedenen, über die Jahre entwickelten Teilmodellen [52–57] auf. Das Modell wird im Bereich von kalten bis heißen Umgebungsbedingungen verwendet und kann mit dem dazugehörigen Behaglichkeitsmodell (siehe Kapitel 2.4) sowohl in gleichförmigen als auch in transienten Umgebungsbedingungen genutzt werden. Wie das Stolwijk Modell besteht es aus einem aktiven und einem passiven Teil.

### Das passive System

Das passive System [52] simuliert den Wärmeaustausch des Körpers mit der Umgebung. Der Grundaufbau des Körpers besteht aus 20 Körpersegmenten (Kopf, Gesicht, Nacken, Brustbereich, Bauch, Hüfte, linke und rechte Schulter, linke und rechte Gliedmaßen. Ober- und Unterarme, Hände, Ober- und Unterschenkel, Füße) [57][58].

Die Körperteile wurden vorher mit 15 [52], bzw. 12 [56] kugelförmigen oder zylindrischen Körpersegmenten dargestellt. Die Körpersegmente sind jeweils in 3 Teile unterschiedlicher Gewichtung (anterior, posterior und inferior) gesplittet. Als Anterior und Posterior sind Körperteile bezeichnet, die im direkten Wärmeaustausch mit der Umgebung stehen. Inferior-Teile werden von anderen Körperteilen überschattet und stehen in einem geringeren Wärmeaustausch mit der Umgebung. Das Model verwendet sieben verschiedene Gewebematerialien, um eine realistische Berechnung zu ermöglichen: Gehirn, Lunge, Knochen, Muskeln, innere Organe, Fett, Haut. Diese sind zusätzlich in einen oder mehrere Gewebe-Knoten unterteilt (siehe Abbildung 2-16).

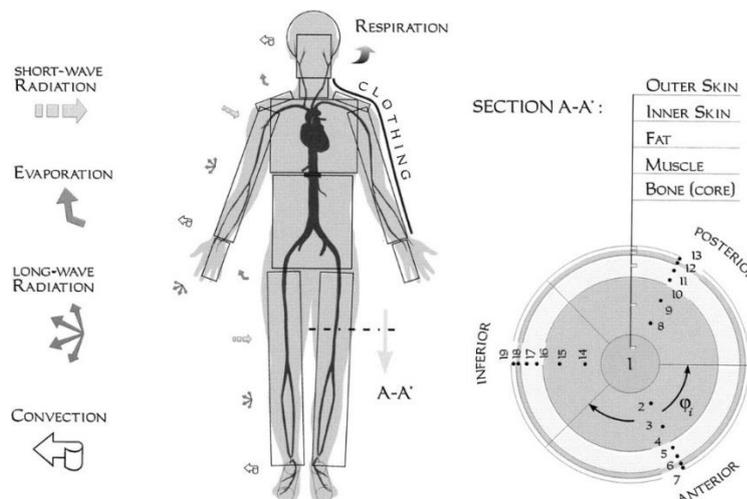


Abbildung 2-16: Fiala Modell - das passive System aus [52]

Die Haut wird mit zwei Schichten dargestellt. In der inneren Schicht wird metabolische Wärmeproduktion simuliert, während die äußere Schicht hauptsächlich dazu dient, die Wärmeabgabe durch Evaporation zu simulieren. Die Kernschicht verbindet alle Körpersegmente thermisch miteinander. Sie wurde für fast alle Körperteile mit einer realistischen Größe modelliert.

### Das Aktive System

Zur Entwicklung des „Aktiven Systems“ wurden alte Experimente mithilfe des „Passiven Systems“ nachgestellt, simuliert und durch Regressionsanalyse erläutert [53]. Das aktive System simuliert mittels der 4 thermischen Regulierungsmechanismen (Zittern, Schwitzen, Vasodilatation und Vasokonstriktion) die thermophysiologicalen Vorgänge im Körper [52]. Zur Simulation der Regulierungsmechanismen werden die Sollwerttemperaturen von Haut und Körperkern sowie die Wechselrate der Hauttemperatur angeführt. Die Wechselrate beschreibt die Hauttemperaturdifferenz zwischen zwei Simulationszeitschritten.

Durch die stetige Weiterentwicklung des Modells über das passive System [52], das aktive System [53] und das „Sensation Model“ [54] entwickelte sich das FPC - Modell (Fiala thermal Physiology and Comfort Model).

Das FPC-Modell berücksichtigt persönliche Merkmale wie Körperbau und Körperfettanteil. Es wurde durch Einführung des „individual heat stress response model“ von Havenith individualisiert, sodass weitere persönliche Parameter berücksichtigt werden konnten [57]. Die Berücksichtigung von individuellen Einflussmerkmalen wirkt sich auf die Körperkerntemperatur in einer Verschiebung der Sollwerttemperaturen aus, was wiederum die thermischen Reaktionen wie Schwitzen und Zittern beeinflusst [57].

Laut Fiala und Havenith kann dieses Modell durch eine einfache Kopplung sowohl mit Simulationsprogrammen wie auch mit Mess-Systemen, verwendet werden [57].

Dieses Modell wird auch von Softwareunternehmen wie beispielsweise Thermoanalytics genutzt [59], wobei hier die physiologischen Berechnungen auf Grundlage des FPC-Modells durchgeführt werden, während die Berechnung der thermischen Behaglichkeit anhand des „Berkeley Comfort Model“ (siehe Kapitel 2.4) erfolgt [60].

### 65MN-Node-Modell und JOS-2

Tanabe [51, 61] hat das Stolwijk-Modell weiterentwickelt und nutzt 16 Körpersegmente mit jeweils vier Schichten (Kern, Muskel, Fett, Haut) pro Körperteil. Es werden Kopf, Brustbereich, Rücken, Hüftbereich, Schultern, Arme, Hände, Oberschenkel, Unterschenkel und Füße dargestellt. Dieses Modell dient auch als Grundlage für das in dieser Arbeit genutzte Physiologie-Modell innerhalb PhySCo (Kapitel 4).

### JOS-2-Modell

Das 65MN-Node-Modell wurde zu JOS-2 [62] weiterentwickelt. Der Kopf wurde noch mal in die Bereiche Nacken und Kopf unterteilt, sodass das Modell 17 Körperteile vorweist.

Alle Körperteile bestehen aus Schichten (Kern, Haut, Arterienblutpool, zentralem Venenblutpool und einem oberflächlichen Venenblutpool). Der Kopf wurde mit zwei zusätzlichen Schichten modelliert, da er der direkten thermischen Umgebung unbedeckt ausgesetzt ist, was eine schnelle physiologische Reaktion erfordert [62].

Ähnlich dem Stolwijk-Modell werden auch hier die thermoregulatorischen Prozesse wie Schwitzen, Zittern, Vasokonstriktion und Vasodilatation berücksichtigt. Durch die Unterteilung in verschiedene Körpersegmente kann das Modell asymmetrische Bedingungen berücksichtigen und ist auch für transiente Bedingungen einsetzbar. Die Eingabeparameter wie Größe, Gewicht, Geschlecht, Alter, Körperfettanteil, Grundumsatz, Herzindex (Herzleistung) können einfach geändert werden.

Die Gliedmaßen sind mit einem detaillierten Oberflächensystem aus Venen und Arterien ausgestattet (AVA), arteriovenöse Anastomosen (AVA – arterio-venous anastomoses) in Händen und Füßen. Arteriovenöse Anastomosen sind direkte Verbindungen zwischen kleinen Arterien und kleinen Venen in der Peripherie des Körpers, sogenannte Kurzschlussverbindungen. Sie sind größtenteils im Hautgewebe von Händen und Füßen anzutreffen. Wenn der Blutstrom vom Herzen nicht ausreicht, um alle Gefäße unter vollem Blutdruck maximal zu durchbluten, können die peripheren Kapillarnetze umgangen werden. Das Blut wird auf direktem Wege zum Herz zurückgeführt. Wegen eines unterschiedlich großen Strömungswiderstands, der in den Kapillaren höher gegenüber der Anastomose ist, fließt mehr Blut durch die Anastomose und als Folge wird das vorgeschaltete Organ weniger durchblutet. Wird im entsprechenden Organ eine höhere Durchblutung benötigt, schließen sich die Anastomosen und es läuft mehr Blut über das Kapillarsystem [63, 64].

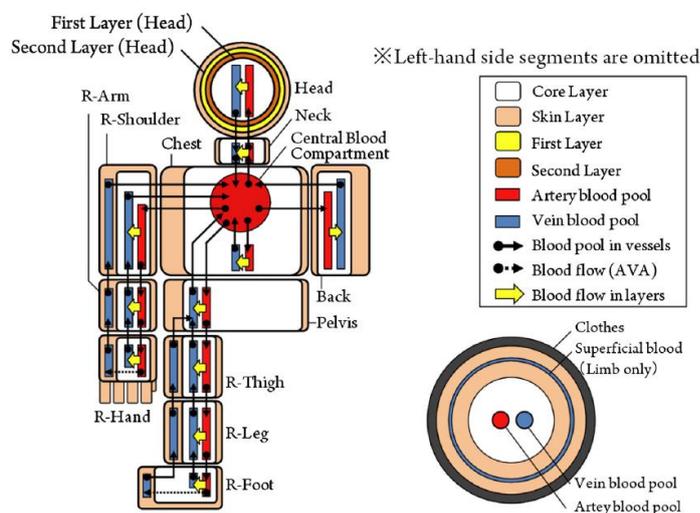


Abbildung 2-17: JOS-2 Modell mit arteriovenösem Modell aus [62]

### UC Berkeley Physiology – Advanced Model

Das „UC Berkeley Physiology –Advanced Model“ [50] wird innerhalb des „Advanced Human Thermal Comfort Model“ genutzt. Es basiert auf dem Stolwijk und dem 65MN - Node Modell von Tanabe [51, 61]. Das Modell berücksichtigt neben den gängigen Wärmeaustauschmechanismen mit der Umgebung ein detailliertes Blutfluss-Modell und den Wärmeaustausch von warmem und kaltem Blut über Arterien und Venen. Das Modell grenzt sich zudem von dem in dieser Arbeit genutzten Physiologie-Modell durch die integrierte Bekleidungsschicht und verschiedenartige Koeffizienten ab. Weiterhin können beim „Advanced Human Thermal Comfort Model“ die Hautfarbe, Gewicht und Körpergröße berücksichtigt werden [60].

### Mehrsegment Modelle

Bei den Mehrsegment-Modellen wird der Körper in verschiedene, meist proportional realistische Körperteile unterteilt. Das bekannteste Mehrsegment-Modell ist das Wissler-Modell, welches stetig weiterentwickelt wurde.

### Wissler

Wissler entwickelte ein detailliertes thermo-physiologisches Mehrsegment-Modell [65]. Das Modell wurde erstellt, um die thermische Behaglichkeit von Astronauten zu berechnen. Es wurde in einem breit angelegten Anwendungsbereich durch Taucher in 450 m Tiefe und bis zu einer Anwendungshöhe von 9000 m validiert. Es modelliert den Körper mit 15 Elementen und 15 Knoten pro Element und setzt sich aus insgesamt 225 Knoten zusammen [66]. Wie bei den Mehrknoten-Modellen werden Muskel, Fett, Knochen, Hautschicht sowie ein Gefäßsystem mit Arterien, Venen und Kapillaren simuliert. Dieses Modell berücksichtigt unter anderem Massenbilanzen für den Sauerstoff- und Kohlenstoffdioxidgehalt [44]. Das aktuellste Wissler-Modell wurde in Zusammenarbeit mit Fiala erstellt und setzt sich aus 3780 verschiedenen Knoten zusammen. Es wird für Berechnungen zu Raumfahrtzwecken genutzt [67].

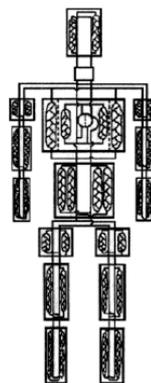


Abbildung 2-18: Repräsentation des 225 Knoten-Wissler Modells aus [67]

## 2.4 Globale und lokale thermische Behaglichkeitsmodelle

Zuvor beschäftigte sich die Forschung größtenteils mit Physiologie-Modellen. Viele Forscher waren daran interessiert zu wissen, wie der menschliche Körper mit extrem kalten oder heißen Umgebungstemperaturen umgeht [68].

Die Berechnung der thermischen Behaglichkeit wurde zunächst für Militär und Raumfahrt interessant [69]. Danach erlangte die Berechnung der thermischen Behaglichkeit für die Automobilindustrie große Bedeutung und erst relativ spät spielte dieses Thema im Bereich der Gebäudetechnik eine Rolle.

In diesem Kapitel werden einige Behaglichkeits-Modelle, die sich im Laufe des letzten Jahrhunderts entwickelt haben, vorgestellt. Die Modelle unterscheiden sich teilweise in deren Einsatzbereichen. Einige dieser Modelle sind jeweils nur für kaltes oder nur für warmes Klima anwendbar.

In der Ermittlung der thermischen Behaglichkeit können Modelle nach physikalischen Eigenschaften (Summengröße) und physiologischen Eigenschaften (thermoregulatorische Modelle) unterteilt werden. Modelle, die eine Bewertung aufgrund der Summengröße durchführen, sind nur statisch anwendbar, während die meisten thermoregulatorischen Modelle dynamische Modelle sind. Zusätzlich wird der adaptive Ansatz vorgestellt.

Eine Bewertung aufgrund der Summengröße erfolgt beispielsweise unter Berücksichtigung der:

- Effektivtemperatur
- Operativen Temperatur

Eine Bewertung mit Thermoregulatorischen Modellen erfolgt mit den folgenden Modellen:

- Fanger's PMV
- TSENS und DISC nach Gagge
- DTS Modell nach Fiala
- UCB Comfort Model

Zur Bewertung mit adaptiven Modellen kommen folgende Methoden zur Anwendung:

- Nach Nicol und Humphreys
- Nach deDear und Brager

### 2.4.1 Globale und stationäre Bewertungsmethoden und Behaglichkeitsmodelle

#### Effektivtemperatur (Houghten und Yaglou)

Vorreiter bei der Ermittlung der thermischen Behaglichkeit waren die Heizungs- und Lüftungsingenieure Houghten und Yaglou [70] nach deren Definition ein behagliches Klima dann vorliegt, wenn es von den Raumnutzer\*innen weder als warm noch als kalt empfunden wird [68]. Die beiden Ingenieure erstellten die erste empirische Skala zur Erfassung der thermischen Behaglichkeit [70]. Zur Ermittlung der Auswirkungen von Lufttemperatur, Feuchtigkeit (später auch Luftstrom) auf die thermische Behaglichkeit

diente die empirische Skala „Effective Temperature“ (ET). Lufttemperatur, Feuchtigkeit und Luftstrom wurden zu einer einzelnen fiktiven Temperatur der Effektiven Temperatur (ET) kombiniert.

Diese Temperaturkombinationen wurden durch Versuche mit Testpersonen in zwei unterschiedlich temperierten Klimakammern generiert [71]. Die Berücksichtigung der Auswirkung der Strahlungstemperatur ist allerdings „unzureichend“ und die Auswirkungen des Luftstromes sind nicht berücksichtigt [71]. Die Einwirkungen der Luftbewegung und der Strahlungstemperatur wurden über die Jahre durch die „Corrective Effective Temperature“ [72] und durch die „Black Globe Temperature“ implementiert. Später wurden diese Faktoren mit der operativen Temperatur von Gagge [68] berücksichtigt.

### Operative Temperatur (Gagge)

Die operative Temperatur ( $t_o$ ) wird auch als Empfindungstemperatur bezeichnet. Sie ist definiert als die Temperatur einer idealen (einheitlichen schwarzen) Umgebung, in der ein Mensch die gleichen Wärmeverluste durch Strahlung und Konvektion erfährt wie in der aktuellen realen Umgebung [68]. Die Berechnung der operativen Temperatur ( $t_o$ ) erfolgt mit folgender Gleichung.

$$t_o = (h_r T_r + h_c T_a) / (h_r + h_c) \quad (2-16)$$

Zur Ermittlung der operativen Temperatur werden die Koeffizienten für den Strahlungsaustausch ( $h_r$ ) und den konvektiven Wärmeübergang ( $h_c$ ), die mittlere Strahlungstemperatur ( $T_r$ ) und die Lufttemperatur ( $T_a$ ) genutzt.

### ET\*/SET

Im Jahr 1986 hat Gagge das von ihm und seinem Team entwickelte 2-Knoten-Modell [73] durch die Einführung zweier neuer Temperaturindices ET\* und SET (Standard Effective Temperature) [74] [68] überarbeitet. ET\* beschreibt die neue effektive Temperatur und SET die „Standard Effective Temperature“ [75].

Die neue effektive Temperatur (ET\*) ist die Temperatur einer wärmeäquivalenten Umgebung mit der relativen Feuchtigkeit von 50 %, einer gleichmäßigen mittleren Strahlungstemperatur  $t_a = t_r$  und einer Luftgeschwindigkeit von  $vel < 0,15 \frac{m}{s}$  bei der eine Person das gleiche Wärme- oder Kältegefühl empfinden würde wie in der tatsächlichen Umgebung [12].

SET\* („Standard Effective Temperature“) ist eine Erweiterung der „neuen effektiven Temperatur“. Sie soll auch dazu dienen, Hitze- oder Kältestress abzubilden. Sie ist definiert als die Temperatur in einer idealen Umgebung mit 50 % Feuchtigkeit, in der eine sitzende Person mit einem Standardbekleidungsgrad von 0.6 clo, einer Luftgeschwindigkeit von  $vel < 0,1 \frac{m}{s}$  mit einer gleichmäßigen mittleren Strahlungstemperatur  $\bar{t}_r = t_a$ , die gleiche Menge Wärme durch spürbare als auch nicht spürbare Wärmeverluste verliert wie in der normalen aktuellen Umgebung. Der SET-

Wert variiert stark mit dem Aktivitäts- und dem Bekleidungsgrad [75]. SET\* kann in Diagrammen abgelesen werden oder mithilfe einer Gleichung berechnet werden [68].

Die Berechnung ähnelt Fanger's PMV Index, da der Komfort-Index auf einer Wärmebilanzgleichung beruht, die sowohl die persönlichen Faktoren wie Grundumsatz als auch Bekleidung beachtet. SET\* berücksichtigt die physiologischen Berechnungen aus dem Zwei-Knoten Modell mit Hauttemperatur und Hautfeuchte [74].

### PMV/PPD

Im Jahr 1970 entwickelte Fanger ein Modell zur Behaglichkeitsbeurteilung [76], welches heute noch von großer Bedeutung ist und seit 1984 in der DIN EN ISO 7730 verankert ist. Der PMV Index wurde bereits in Kapitel 2.1(DIN EN ISO 7730) vorgestellt.

Im Zusammenhang mit dem PMV Index steht der PPD Index (Predicted Percentage of Dissatisfied), welcher die Unzufriedenheitsrate beschreibt. Diese Werte zeigen, dass selbst bei optimalen klimatischen Raumbedingungen, Aktivitätsgrad und Bekleidungsrate immer mit einem Anteil unzufriedener Personen zu rechnen ist (Abbildung 2-1).

Zur Ermittlung des PMV Index werden der Aktivitätsgrad, der Bekleidungsgrad, die Raumlufttemperatur, die mittlere Strahlungstemperatur, die Luftgeschwindigkeit und die Luftfeuchte mit einbezogen. Dies ist zugleich der Nachteil dieses Modells, da nur die messbaren physikalischen äußeren Umgebungsbedingungen berücksichtigt werden und die physiologischen Reaktionen des menschlichen Körpers auf diese Umgebungseinflüsse unbeachtet bleiben. Weiterhin bezieht sich der PMV Index nur auf stationäre und homogen klimatische Umgebungsbedingungen und ist somit für eine detaillierte Behaglichkeitsanalyse unzureichend.

Lange Zeit wurden überwiegend die letzten vorgestellten Modelle genutzt (Gagge's Physiologie Modell mit ET\*, SET, und Fanger's PMV Modell [76]). Diese beiden Modelle berücksichtigen jedoch nur gleichförmige und symmetrische Umgebungsbedingungen. Erst danach beschäftigen sich Wissenschaftler\*innen mit Behaglichkeitsmodellen für transiente asymmetrische Umgebungsbedingungen [50, 51, 54, 55, 77-79].

## 2.4.2 Lokale und veränderliche Behaglichkeitsmodelle und weitere Ansätze

### TSENS und DISC

Die Berechnung für TSENS und DISC erfolgt zusammen mit dem 2-Knoten Modell von Gagge [80][35]. Nach der Berechnung der mittleren Hauttemperatur  $t_{sk}$ , der Körperkerntemperatur  $t_c$  und dem auf der Haut befindlichen Schweißfilm  $w$ , können die Unbehaglichkeit (DISC) und das thermische Empfinden (TSENS) berechnet werden. TSENS repräsentiert eine Skala des thermischen Empfindens [35]. Sie basiert auf der Skala des PMV-Index, unterscheidet sich jedoch im Bereich der zusätzlichen Empfindungsstufen von +5 und -5.

Tabelle 2-3: Skala von TSENS angepasst aus [35]

+5	Unerträglich heiß
+4	Sehr heiß
+3	heiß
+2	warm
+1	Leicht warm
0	Neutral
-1	Leicht kühl
-2	Kühl
-3	Kalt
-4	Sehr kalt
-5	Unerträglich kalt

Tabelle 2-4: Skala von DISC angepasst aus [35]

5	Unerträglich
4	Begrenzt tolerierbar
3	Sehr unbehaglich
2	Unbehaglich und unbequem
1	Etwas unbehagl. aber akzeptabel
0	Behaglich

Die Behaglichkeitsberechnung nach DISC bezieht sich rein auf warme Umgebungsbedingungen und wird mithilfe der auf der Haut befindlichen Feuchtigkeit berechnet [31]. Die Berechnung von TSENS ist als die Abweichung der mittleren Körpertemperatur  $t_b$  vom unteren (kalten)  $t_{b,c}$  und oberen (warmen)  $t_{b,h}$  Sollwert definiert [35]:

$$t_{b,c} = \frac{0.34}{58.15}(M - W) + 97.34 \quad (2-17)$$

$$t_{b,h} = \frac{0.608}{58.15}(M - W) + 98.0 \quad (2-18)$$

$$TSENS = \begin{cases} 0.26(t_b - t_{b,c}) & t_b < t_{b,c} \\ \frac{4.7\eta_{ev}(t_b - t_{b,c})}{t_{b,h} - t_{b,c}} & t_{b,c} \leq t_b \leq t_{b,h} \\ 4.7\eta_{ev} + 0.26(t_b - t_{b,h}) & t_{b,h} \leq t_b \end{cases} \quad (2-19)$$

$\eta_{ev}$  repräsentiert die Verdunstungseffizienz und wird mit einem Faktor von 0.85 angenommen [20].

$$DISC = \begin{cases} 0.26(t_b - t_{b,c}) & t_b < t_{b,tc} \\ \frac{4.7(E_{rsw} - E_{rsw,req})}{E_{max} - E_{rsw,req} - E_{dif}} & t_{b,c} \leq t_b \end{cases} \quad (2-20)$$

### DTS, Dynamic thermal sensation Model (Fiala)

Das dynamische thermische Behaglichkeits-Modell (DTS „dynamic thermal sensation Model“) [55] basiert auf dem Physiologie-Modell von Fiala (siehe Kapitel 2.3.2). Das globale Temperaturempfinden hängt hierbei von den Haut- und Kerntemperaturen sowie der Veränderung der mittleren Hauttemperatur ab [81].

Das dynamische thermische Modell (DTS) wurde aus Ergebnissen älterer Studien abgeleitet. Da die Studien keine Auskunft über Hauttemperaturen, lokales Empfinden und lokale Behaglichkeit gaben, wurden die Studien mit dem Fiala-Physiologie-Modell nachgestellt und die Hauttemperaturen simuliert. Danach wurde das Behaglichkeits-Modell durch Regressionsanalyse entwickelt.

Die Regressionsanalyse führte zu dem Ergebnis, dass die mittlere Hauttemperatur  $T_{skm}$  das Wärmeempfinden am besten abbilden kann. Das Modell kann auch die Auswirkungen des Verzehr von kalter oder warmer Nahrung abbilden [55]. Das Fiala Physiologie-Modell kann einzelne lokale Körperteile berücksichtigen, während das Behaglichkeits-Modell nur die globale Behaglichkeit abbilden kann.

### UC Berkeley Model – Advanced Model

Das UC Berkeley Model berücksichtigt sowohl lokales und globales Empfinden einzelner Körperteile als auch lokale und globale Behaglichkeit. Es gilt als eines der fortschrittlichsten verfügbaren Modelle. Das Behaglichkeits-Modell wird auch in Kombination mit anderen Physiologie-Modellen (z.B Fiala-Modell) genutzt.

Das Behaglichkeits-Modell basiert auf den Gleichungen von Hui Zhang [77–79] und wird in Kapitel 4 unter dem „Sensation and Comfort“ Modell vorgestellt.

### Adaptives Behaglichkeits-Modell

*“If a change occurs such as to produce discomfort, people react in ways, which tend to restore their comfort.” [82][83]*

Mit diesem Ansatz begannen die ersten Feldversuche Mitte der 70-er Jahre [82] mit dem Ziel, die Thematik der adaptiven Behaglichkeit zu untersuchen. Die adaptive Behaglichkeit beschreibt das Phänomen, dass sich Menschen den Außentemperaturen auf natürliche Weise anpassen.

Durch die eigenständige Anpassung ist es dem Menschen möglich, den thermisch physiologischen Stress in Gebäuden zu reduzieren. Diese Anpassungen können sich auf

den Menschen selbst, beispielsweise Anpassung der Kleidung oder auf Änderungen der unmittelbaren Umgebungsbedingungen wie beispielsweise regelmäßiges Fensteröffnen beziehen.

Die Anpassungen beinhalten auch längerfristige Änderungen des Organismus, wie die Änderung der Sollwert-Temperaturen des Körpers, welche wiederum die Grenzen für die physiologische Stressminimierung durch Schwitzen, Vasodilatation und Vasokonstriktion verschieben [35].

Die Grundlagen des „Adaptive Thermal Comfort“ Modells wurden in einer großen Sammlung weltweiter Feldstudien unterschiedlicher Gebäudetypen und Klimaregionen gelegt. In den Studien wurden die Gebäudenutzer\*innen über ihr subjektives Empfinden mithilfe von Behaglichkeitsskalen befragt. Mit den Ergebnissen wurde der erste „Adaptive Comfort“ Standard veröffentlicht [17].

Es hat sich eine größere Anzahl Wissenschaftler\*innen zusammengefunden, die im Kontext zu ASHRAEs „thermal comfort technical comitee“ (TC 2.1) und Annex 69 (International Energy Agency Energy in Buildings and Communities Programme, Annex 69, Strategy and Practice of Adaptive Thermal Comfort in Low Energy Buildings) Daten sammeln und in einer Datenbank zusammenstellen ([www.comfortdatabase.com](http://www.comfortdatabase.com)).

Die Berechnung behaglicher Temperaturen  $t_c$  kann mit den monatlichen Außentemperaturen  $t_{out}$  über folgende Gleichung nach [84][35] erfolgen:

$$t_c = 75.6 + 0.43(t_{out} - 71.6)exp - \left(\frac{t_{out} - 71.6}{61.1}\right)^2 \quad (2-21)$$

Für Gebäude in Klimagebieten, in denen weder Heizung noch Kühlung benötigt werden, kann die operative Behaglichkeitstemperatur  $t_{oc}$  (siehe Kapitel 2.4.1) auch nach der Studie von deDear und Brager [85] nach folgender Gleichung erfolgen [35]:

$$t_{oc} = 66 + 0.142(t_{out} - 32) \quad (2-22)$$

Oben genannte Gleichungen beziehen sich hauptsächlich auf die durchschnittliche Monats-Außentemperatur und haben somit keinen direkten Einfluss auf die Wärmebilanzgleichung des Menschen.

Um thermisch akzeptable Bedingungen nach dem adaptiven Ansatz einzuhalten, müssen folgende Bedingungen eingehalten werden [12]:

- Kontrolle der Nutzer\*innen und natürliche Belüftung des Außenbereichs
- Kein mechanisches Kühlsystem und kein Heizsystem in Betrieb
- Die metabolische Rate liegt im Bereich von 1,0 bis 1,3 met
- Freie Kleidungswahl im Bereich von 0,5 bis 1,0 clo
- Vorherrschende mittlere Außentemperatur liegt im Bereich von 10 °C bis 33,5 °C

Abbildung 2-19 repräsentiert den behaglichen Bereich mittels des adaptiven Ansatzes.

## Alliästhesie

Der Begriff Alliästhesie wurde erstmals von Cabanac geprägt [86]. Er beschreibt, dass angenehme Empfindungen durch die Wiederherstellung eines neutralen Zustandes aus einem körperlichen Stress erzeugt werden oder der Stress in Richtung eines neutralen Zustandes gelenkt wird. Die ursprüngliche Definition konzentrierte sich ausschließlich auf transiente Effekte und wird als „temporale Alliästhesie“ [87] bezeichnet. Eine weitere Definition beschreibt die räumliche Alliästhesie als die Einwirkungen, die lokal differenziert auf den Körper wirken.

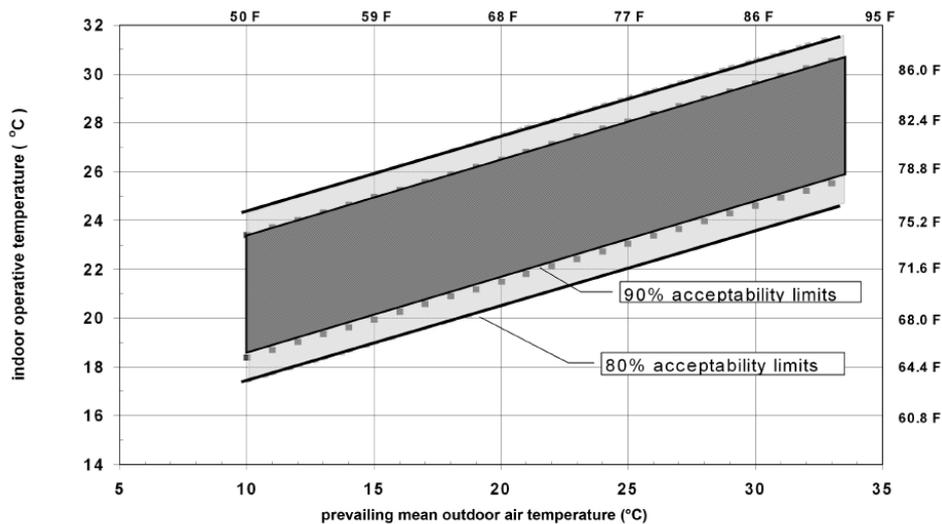


Abbildung 2-19: Spanne der behaglichen operativen Temperaturen für natürlich belüftete Gebäude nach dem Adaptiven Ansatz aus [12], x-Achse repräsentiert die mittlere Außentemperatur, y-Achse repräsentiert die Innentemperaturen

Die Alliästhesie spielt eine große Rolle für den Einsatz von dezentralen Systemen. Dezentrale Heiz- und Kühlsysteme, wie sie in Kapitel 3 vorgestellt werden, klimatisieren einzelne Körperteile. Diese dezentralen Heiz- und Kühlsysteme bedienen unterschiedliche Ansätze der Alliästhesie durch die Berücksichtigung lokaler Körpersegmente und durch direktes Kühlen oder Wärmen von Körpersegmenten. Weiterhin kann es durch unterschiedliche thermische Stimulierung der Körperteile zu thermischem Wohlbefinden kommen. Unterschiedliche thermische Kombinationen für einzelne Körperteile können eine größere Behaglichkeit hervorrufen als ein thermisch globaler neutraler Zustand auf den ganzen Körper [87].

## 2.5 Physiologie- und thermische Behaglichkeitsmodelle in der Gebäudesimulation

Bis Mitte der 1960er Jahre waren zur Berechnung des Gebäudeenergieverbrauchs einfache Handrechnungen üblich [88]. Energiebilanzkonzepte für dynamische Gebäudesimulationen wurden in den 1970er-Jahren eingeführt, um die thermischen Gebäudelasten zu berücksichtigen. Bei den Wärmebilanzmodellen werden alle Einflüsse

durch den Standort, Wetterdatensätze, Materialeigenschaften und die Wärmetransportvorgänge berücksichtigt [88].

Später erfolgte die Weiterentwicklung der Modelle, um die Wärmebilanzmodelle auch im Bereich der relevanten Gebäude- und Anlagenkomponenten zu nutzen [89]. Um 1980 war es möglich, die Interaktion zwischen den zentralen Heiz- und Kühlsystemen mit den Gebäuden zu simulieren [88].

Im Bereich der Gebäudesimulationsprogramme ist es üblich, Fanger's PMV und PPD Modell zur Behaglichkeitsermittlung zu nutzen. Das Modell ist von ASHRAE und DIN ISO 7730 anerkannt, dient jedoch nur einer allgemeinen Ermittlung der Behaglichkeit. Oft genutzte dynamische Gebäudesimulationssoftware wie TRNYSY [90], Energy+ [91], IDA ICE [92] nutzen zur Ermittlung der Behaglichkeitswerte die stationären und globalen Methoden PMV, SET, ET.

### 2.5.1 Gebäudesimulation mit dynamischen Behaglichkeitsmodellen

Einige Gebäudesimulationsprogramme erlauben auch eine Berechnung der Behaglichkeit auf Grundlage dynamischer und transienter Kriterien.

Das Simulationsprogramm THESEUS-FE [93] nutzt das Physiologie-Modell von Fiala (Kapitel 2.3.2) und kann mit dem „Sensation and Comfort“ Modell des „UC Berkeley Models“ ergänzt werden (Kapitel 2.4.2). Zur Berechnung der thermophysiological Vorgänge stützt sich das Modell auf die Wärme Gleichung von Pennes [93]. Die Pennes Biowärmeübertragungsgleichung „Pennes' Bioheat Transfer Equation“ war eine der ersten Gleichungen, welche die Wärmeverteilung des menschlichen Gewebes beschreibt. Die Gleichung wurde basierend auf verschiedenen Experimenten, bei denen die Temperaturen des Gewebes und des arteriellen Blutes gemessen wurden, aufgestellt. Die Gleichung beschreibt die Wärmeübertragung zwischen Gewebe und Blut.

Die Pennes-Gleichung ist eine Näherungsgleichung und hat keine physikalisch konsistente theoretische Grundlage, dennoch kann diese Gleichung in vielen Anwendungen die Temperatur gut vorhersagen. Die Gleichung übergeht die Richtungsabhängigkeit der Durchblutung und vernachlässigt den konvektiven Wärmeübergang.

THESEUS-FE führt thermische Berechnungen sowohl in Fahrzeug- und Flugzeugkabinen wie als auch in Gebäuden durch. Bei den Behaglichkeitsberechnungen können die Nutzer\*innen zwischen den verschiedenen Modellen auswählen:

- Fanger's PMV & PPD,
- Fiala's TS & DTS,
- UC Berkeley Model,
- äquivalente Temperatur (ET).

Das Programm TAItherm [59] nutzt ein Thermoregulationsmodell und scheint sehr ausgereift zu sein. Es stützt sich ebenfalls auf der Wärme Gleichung von Pennes und kann zur Berechnung der thermischen Behaglichkeit auch das „UC Berkeley Model“ nutzen. Es

wird sowohl im Automobil-, Luftfahrt- und Textildbereich als auch für Gebäudesimulationen genutzt.

1994 wurde das Stolwijk-Modell mithilfe eines zusätzlichen „TRNSYS-Tool“ in TRNSYS [90] implementiert. Am Modell wurden leichte Änderungen durchgeführt, die die Wärmetransfergleichungen betreffen und zusätzlich wurde Bekleidung berücksichtigt [94]. Dennoch nutzt TRNSYS zur Zeit der Veröffentlichung dieser Arbeit lediglich die oben genannten statischen Methoden.

Holopainen [95] hat in die Gebäudesimulationssoftware „VTT House building simulation tool“ ein gekoppeltes Physiologie- und Behaglichkeitsmodell implementiert [95]. Hierzu wurden das 65MN-Node-Modell (siehe Kapitel 2.3.2) und die ältere Version des „Sensation and Comfort Model“ von Zhang [96] genutzt.

Andere Thermophysiologie Modelle sind auf Grundlage von CFD Simulationen („Computational Fluid Dynamics“) innerhalb der Gebäudesimulation gekoppelt. Rida [97] beschreibt eine Kopplung mittels eines thermophysiologischen Manikins, welches den Wärmeeintrag eines Manikins in den Raum, während einer CFD Simulation, berücksichtigt. Das Thermophysiologie Modell basiert auf den Gleichungen des „Zwei-Knoten-Modells“ von Gagge. Eine Betrachtung des thermischen Empfindens und somit auch der thermischen Behaglichkeit des Manikins wurde jedoch nicht weiterverfolgt.

Auch andere Physiologie-Modelle wie das 65-MN-Modell [51, 98] wurden mittels CFD-Simulationen gekoppelt. Für viele Modelle erfolgte die Kopplung alleine um die Auswirkungen des Menschen auf den Raum zu simulieren. Andere legten den Fokus auf die Ermittlung der thermischen Behaglichkeit.

So koppelte Streblov et al. [99] das 65-MN-Modell [51] mit einer CFD Simulation, um das thermische Empfinden und die thermische Behaglichkeit zu berechnen. Hier wurde das ältere „Sensation and Comfort Model“ von Zhang [96] genutzt.

### 3 Dezentrale Heiz- und Kühlsysteme

*“ASHRAE Standard 55’s target satisfaction rate among occupants is 80%, but in practice buildings often rate much lower than that.” [87]*

ASHRAE Standard 55 definiert als Ziel eine Zufriedenheit von 80 % der Nutzer\*innen. Dieses Ziel wird in der Praxis oft verfehlt, denn der reine Einsatz zentraler Heiz- und Kühlanlagen reicht oft nicht aus, um allen Gebäudenutzer\*innen zu einem thermisch behaglichen Zustand zu verhelfen. Weiterhin kommt hinzu, dass die Temperierung eines Raumvolumens auf beispielsweise 24 °C oft nicht energieeffizient ist.

Wie zuvor bereits angedeutet, kam man in der Forschung der Physiologie- und Behaglichkeitsmodellen zur Erkenntnis, dass einige Körperteile bei lokaler Unbehaglichkeit großen Einfluss auf die globale Behaglichkeit des Menschen haben [77–79]. Der Kopf reagiert sehr stark auf Hitze [96, 100] [87], wohingegen der Rücken und der Hüftbereich sowohl sensibel auf Kälte [96], als auch auf Wärme reagieren [87]. Diese Unterschiede im lokalen Temperaturempfinden einzelner Körperteile können in der zentralen Gebäudetechnik nicht berücksichtigt werden.

Da sich die individuellen Anforderungen an das Raumklima erwartungsgemäß stark voneinander unterscheiden, werden sich niemals alle Personen in einem Raum gleichzeitig unter den gegebenen thermischen Umgebungsbedingungen behaglich fühlen. Dies zeigen die Studien von Fanger in Abbildung 2-1(Kapitel 2.1) [76]. Das Diagramm stellt den vorhergesagten Prozentsatz an thermisch unzufriedenen Personen (PPD-Predicted Percentage of Dissatisfied) dar. Es zeigt, dass selbst bei neutralen Umgebungsbedingungen circa 5 % der Personen unzufrieden mit dem Raumklima sind.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die zentrale Heiz- und Kühlanlage auf folgende Faktoren nicht eingehen kann:

- Berücksichtigung des lokalen Temperaturempfindens einzelner Körperteile
- Berücksichtigung von Allästhesie durch schnelle lokale Temperaturwechsel
- Berücksichtigung der individuellen Temperaturpräferenz der Menschen.

Ein Ansatz, der die oben genannten Faktoren einbezieht, ist die Anwendung dezentraler Heiz- und Kühlsysteme zur direkten und individuellen Temperierung der Nutzer\*innen.

#### 3.1 Ansatz des „Personalized Environments“

Dezentrale Heiz- und Kühlansätze zur Berücksichtigung des „Personalized Environments“, auch „Personal Comfort Systems“ genannt, sind die Nutzung von dezentralen Heiz- und Kühlsystemen, die einen geringen Energiebedarf aufweisen und zusätzlich die individuelle Behaglichkeit verschiedener Nutzer\*innen steigern können. Sie können dazu beitragen, die Spannweite der behaglichen Raumtemperaturen zu vergrößern [101][102, 103] und Energie bei der zentralen Heiz- und Kühlanlage einzusparen [7]. Die dezentralen Ansätze des „Personalized Environments“ greifen mehrere wichtige Punkte zur Steigerung der Behaglichkeit auf.

Mishra et al. beschreiben in ihrer Arbeit eine Skala mit erweitertem Behaglichkeitsbereich, der im unteren Temperaturbereich (Heizsollwerte) durch dezentrale Heizsysteme und im oberen Temperaturbereich (Kühlsollwerte) (von 27 °C bis 30 °C) durch einen erhöhten Luftzug erweitert wurde [104].

Der Effekt der „Selbsteinflussnahme“ auf die direkte thermische Umgebung hat eine große psychologische Bedeutung. Die Menschen fühlen sich den Umgebungsbedingungen nicht „ausgeliefert“, sondern haben die Möglichkeit zur persönlichen Einflussnahme im Steuerungsprozess [6].

Bei Anwendung der dezentralen Heiz- und Kühlsysteme werden die zwei Ansätze von „Thermischer Allästhesie“ nach Kapitel 2.4.2 benutzt:

1. „Zeitliche Allästhesie“ - bezieht sich auf den ganzen Körper und zeigt die zeitlich thermischen Änderungen, denen der Körper ausgesetzt wird.
2. „Räumliche Allästhesie“ – bezieht sich auf lokale Körpersegmente und auf verschiedene thermische Stimuli, die lokal auf unterschiedliche Körperoberflächen wirken.

Das Verhalten zeigen auch Studien von Zhang [96]. In kalter Umgebung kann es helfen, die Füße und Hände zu wärmen, während es in warmem Umgebungsklima sinnvoll ist, den gegenüber Hitze empfindlichen Kopf zu kühlen.

Durch das Ausgleichen lokaler Unbehaglichkeiten mit dezentralen Heiz- und Kühlsystemen kann die Spannweite der thermisch behaglichen Raumlufttemperaturen ausgedehnt werden. Somit wird die zentrale Heiz- und Kühlanlage energetisch entlastet, was zu Energieeinsparungen führen kann [7].

Mögliche Energieeinsparungen durch die Erweiterung der behaglichen Raumtemperaturen wurden unter anderem mithilfe von Gebäudesimulationen berechnet [7]. Die Studie von Hoyt et al. zeigt eine Abbildung (Abbildung 3-1), die die Energieeinsparungen der zentralen Gebäudeanlage auf der y-Achse repräsentiert. Die x-Achse zeigt die Erweiterung der thermisch behaglichen Raumtemperaturen, ausgehend von den Anfangssollwerten von 21,1 und 22,2 °C. Die Simulationen wurden mit unterschiedlichen klimatischen Bedingungen durchgeführt.

Dezentrale Heiz- und Kühlsysteme können vergleichsweise günstig in allen Gebäudetypen implementiert werden und demnach zur klimaeffizienten Erneuerung alter Gebäudebestände beitragen.

Dezentrale Systeme waren erstmals unter dem Namen „Task Ambient Control“ (TAC), später auch als „Personal Comfort Systems“ (PCS) oder auch „Personal Environmental Control Systems“ (PEC) bekannt geworden [105, 106]. „Personal Comfort Systems“ (PCS) nehmen Einfluss auf die direkte thermische Umgebung, während „Personal Environment Control Systems“ (PEC) sowohl Einfluss auf die direkte thermische Umgebung als auch auf die Luftqualität der Umgebungsluft nehmen [87].

Die dezentralen Systeme benötigen im Vergleich zu einer zentralen Heiz- und Lüftungsanlage verhältnismäßig wenig Energie. Hierbei ist auch zu beachten, dass nicht alle Nutzer\*innen gleichzeitig die Klimafunktionen der Systeme benutzen werden.

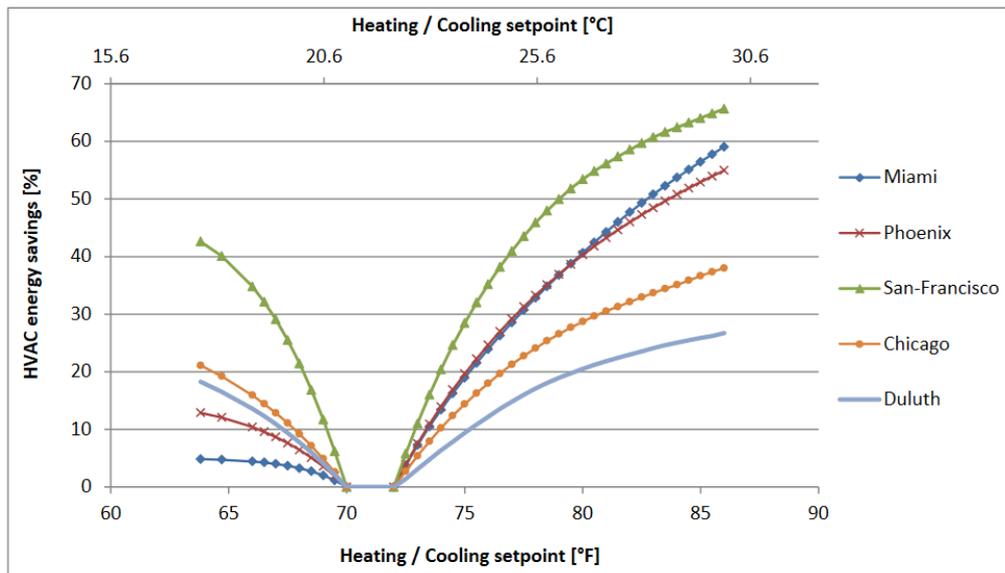


Abbildung 3-1: Einfluss von dezentralen Systemen auf Energieeinsparungen der zentralen Gebäudetechnik aus [7]

Andere Studien zeigen, dass es bereits zu einer Steigerung des Wohlbefindens führen kann, wenn den Menschen die Möglichkeit gegeben wird, dass sie selbst Einfluss auf die direkte thermische Umgebung nehmen können [6].

Abgesehen vom alltäglichen Gebrauch dieser Systeme können die dezentralen Systeme auch Gebäude mit Planungsmängeln aufwerten, indem sie beispielsweise die Auswirkungen von Zegerscheinungen an großen Fassaden, starke Erwärmung des Raums durch Sonneneintrag oder Planungsfehler in der zentralen Anlage kompensieren.

Ein weiterer denkbarer Vorteil der dezentralen Systeme ist es, dass bei vermehrtem Anschalten einer Klimafunktion die zentrale Gebäudeanlage automatisch erkennt, welche Funktionen genutzt werden und sich die zentrale Gebäudeanlage in Folge anpassen kann. Hierbei könnten auch angepasste Profile angelegt werden, die es in Zukunft erlauben sollen, mögliche Präferenzen der Nutzer\*innen zu erkennen und die Anlagen dementsprechend anzupassen.

Ein dezentrales Heiz- und Kühlsystem kann zum Beispiel ein Bürostuhl mit Heiz- und Kühlfunktion [107, 108] [109], ein Fußwärmer [110], ein Tisch-Ventilator [111] oder eine thermoelektrische Stellwand [112] sein (Abbildung 3-2).

Die Tischventilatoren und Fußwärmer wurden erstmals in Berkeley entwickelt und getestet [113]. Eine Studie zeigte, dass mithilfe der Fußwärmer die Heizsollwerttemperatur im Büro um 2,3 °C gesenkt werden konnte (von 21.2 °C auf 18.9 °C) während gleichzeitig ein behagliches Level für die Raumnutzer\*innen gehalten wurde [110]. Weiterhin konnten je nach Außen- und Sollwerttemperatur 38 - 75 % der Heizenergie eingespart werden [110].



Abbildung 3-2: Dezentrale Heiz- und Kühlsysteme, Tischventilator, Fußwärmer, Bürostuhl mit Heiz- und Kühlfunktion

Die Füße und Hände reagieren in kühler Umgebung sehr sensibel auf Kälte und haben dadurch großen Einfluss auf die globale Behaglichkeit des Menschen [87]. Werden die Füße gewärmt, obwohl sich der Mensch insgesamt eher kühl anfühlt, kann dies zu einer höheren globalen Behaglichkeit beitragen. Der Fußwärmer wärmt isoliert die Fußoberseite über vier Glühbirnen. Eine Erweiterung des Fußwärmers stellen die beheizten Schuheinlagen und die beheizten und gekühlten Handgelenk pads dar [102, 103].

Der Ventilator soll den auf Hitze sensibel reagierenden Kopf kühlen [87]. Dies geschieht über die Ventilation der Umgebungsluft. Die Steigerung der Behaglichkeit erfolgt durch die physikalische Wirkung des Luftzugs selbst (Verdunstungskälte) und durch das Gefühl eines Luftaustausches.

## 3.2 Beispiele für dezentrale Heiz- und Kühlsysteme

### 3.2.1 Bürostuhl mit Heiz- und Kühlfunktion

Die Technologie der Sitzheizung und -kühlung kommt aus dem Automobilbereich und wird seit einigen Jahren auch in Bürogebäuden in Form von Bürostühlen mit Heiz- und Kühlfunktion verwendet [107, 108, 114].

Es gibt unterschiedliche Systeme, die sich in der Art der Kühlungs- und Heizfunktion, zum Beispiel mit Heizdrähten und Ventilatoren (Abbildung 3-3) oder thermoelektrische Systeme in Sitz- und Rückenflächen unterscheiden.

#### Heiz- und Kühlfunktion

Die Klimafunktionen und die Leistungsstufen werden über zwei Kippschalter geschaltet (Abbildung 3-4). Die Kühlung erfolgt für den vorgestellten Bürostuhl über Ventilatoren in Sitz- und Rückenfläche. In Folge der Ventilation wird der Luftstrom und dadurch der konvektive Wärmeübergang erhöht, was zu einem Verdunsten der auf der Haut befindlichen Feuchtigkeit führt und in Folge zu einer Kühlung der Hautoberfläche führt (Verdunstungskälte). Das Heizen der Stühle erfolgt mittels Heizdrähten in Sitz- und Rückenfläche [107, 108, 114].



Abbildung 3-3: Klimastuhl mit Heiz- und Lüftungsfunktion in Sitz- und Rückenflächen von [115]

Mit dem verhältnismäßig kleinen Lithium-Ionen-Akku (Batteriekapazität 5200 mAh, 11.1 Volt) werden die in Tabelle 3-1 angegebenen Akkulaufzeiten erreicht.

Tabelle 3-1: Technische Angaben zu Akkulaufzeit laut Hersteller und Akkuleistung im Hinblick auf die unterschiedlichen Klimafunktionen und Leistungsstufen

FUNKTION UND LEISTUNGSSTUFE	AKKULAUFZEIT [H]	LEISTUNG [W]
<b>KÜHLEN I</b>	32	4
<b>KÜHLEN II</b>	16	8
<b>HEIZEN I</b>	17	12
<b>HEIZEN II</b>	8	16

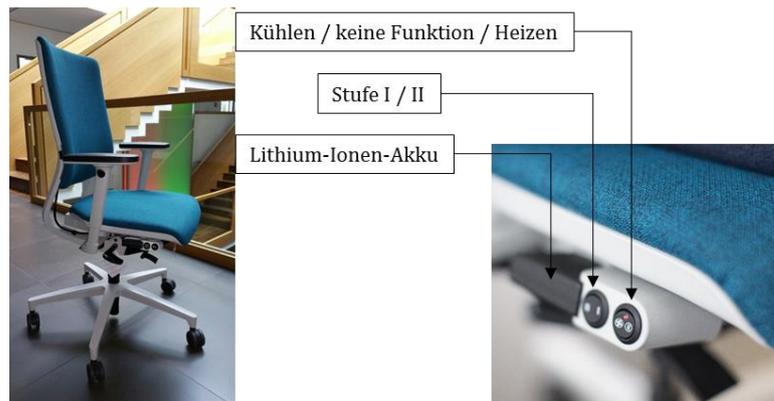


Abbildung 3-4: Bürostuhl mit Heiz- und Kühlfunktion mit Kontrollvorrichtung

### Wirkungsweise

Die Bürostühle mit Heiz- und Kühlfunktion sollen die thermische Behaglichkeit des Menschen steigern. Durch die direkte Temperierung des Rücken- und Hüftbereichs werden somit zwei Bereiche des menschlichen Körpers angesprochen, die großen Einfluss auf die globale Behaglichkeit des Menschen haben [77–79].

Der Rücken reagiert sehr sensibel auf Kälte, sodass die Nutzung der Wärmefunktion bei einer Senkung der behaglichen Raumlufttemperatur vielversprechend ist. Die Nutzung der Kühlfunktion ermöglicht eine größere Akzeptanz für höhere Raumtemperaturen. Die Steigerung der thermischen Behaglichkeit wurde sowohl in Klimakammer- [109] und Feldstudien [107, 108, 116], als auch in Simulationsstudien gezeigt [7].

### Steigerung der thermischen Behaglichkeit

Die Wirkung der Klimastühle auf die thermische Behaglichkeit wurde in zwei Studien getestet. Im Jahr 2015 wurde der Prototyp der Klimastühle in einer Feldstudie im Deutschen Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) getestet [107]. Nach der Weiterentwicklung des Prototyps fand eine weitere Studie im Jahr 2016 unter kontrollierten Umgebungsbedingungen im „Living lab smart office space“ in Kaiserslautern statt [114]. Beide Studien zeigten, dass eine Verbesserung der thermischen Behaglichkeit durch die Nutzung der Klimastühle möglich ist.

### Feldstudie 2015

Während der Feldstudie 2015 im DFKI in Kaiserslautern [107, 108] lagen über einen langen Zeitraum extrem hohe Raumtemperaturen vor. In dieser Zeit konnten die Stühle das thermische Empfinden der Studienteilnehmer\*innen oft senken und so zu einer besseren Behaglichkeit beitragen. Die Lüftungsfunktion konnte den Schweißbelag auf der Haut und Kleidung reduzieren und somit den „Anklebe-Effekt“ bei sommerlichen Temperaturen verringern.

Die Heizfunktion kam bei allen Studienteilnehmer\*innen sehr gut an und es wurde vereinzelt auch über positive Effekte bei Rückenschmerzen berichtet. Gleichwohl führte die Lüftungsfunktion bei einigen der Nutzer\*innen zu einem unangenehmen Kältegefühl im Rücken- und Hüftbereich.

Während der Studie waren acht Bürostühle im Einsatz, deren Nutzung ständig über einen Datenlogger aufgezeichnet wurde. Die Daten gaben Auskunft über die genutzte Funktion und Nutzungsdauer. Gleichzeitig wurden die Raumtemperaturen und die Luftfeuchtigkeit mitgeloggt. Die Nutzer\*innen füllten mehrmals täglich einen digitalen Umfragebogen, in denen ihre Behaglichkeit und das Empfinden abgefragt wurden, aus. Die positiven Auswirkungen des Bürostuhles mit Heiz- und Kühlfunktion während der Feldstudie lassen sich in Tabelle 3-2 zusammenfassen.

Anhand der Umfragebögen konnte ein Vergleich des thermischen Empfindens und der Behaglichkeit vor und nach der Nutzung der Klimafunktionen erfolgen. In annähernd 35 % der Fälle konnte das thermische Empfinden mit der Nutzung der Kühlfunktion gesenkt werden, was zu einer Steigerung der Behaglichkeit in 31 % der Fälle führte.

Während der kühleren Tage wurde auch die Heizfunktion genutzt. Die Heizfunktion konnte in 85 % der Nutzungsfälle das Empfinden und die Behaglichkeit in 83 % der Fälle steigern. In rund 62 % der Fälle konnte durch die Nutzung der Kühlfunktion keine Auswirkungen auf das thermische Empfinden und die thermische Behaglichkeit bemerkt werden. Dies wurde durch die hohen Raumtemperaturen, die teilweise um die 40 °C lagen, erklärt.

Tabelle 3-2: Auswirkungen der Nutzung des Bürostuhles mit Heiz- und Kühlfunktion während der Feldstudie im Jahr 2015. (+: Steigerung, 0: keine Änderung, -: Minderung) aus [108]

	Anzahl der Abstimmungen	+	0	-
<b>KÜHLUNG</b>				
Auswirkungen auf das Empfinden	228	3,1 %	62,3 %	<b>34,6 %</b>
Auswirkungen auf die Behaglichkeit	219	<b>31,1 %</b>	61,6 %	7,3 %
<b>HEIZEN</b>				
Auswirkungen auf das Empfinden	67	<b>85,1 %</b>	14,9 %	0 %
Auswirkungen auf die Behaglichkeit	64	<b>82,8 %</b>	14,1 %	3,1 %

Die Feldstudie im Jahr 2015 zeigte, dass bei höheren Raumtemperaturen über 30 °C Limitationen vorliegen (Abbildung 3-5 und Abbildung 3-6). Trotz Nutzung der Kühlfunktion konnten das thermische Empfinden und somit auch die Behaglichkeit nicht weiter gesteigert werden. Es scheint, als ob die Lüftungsfunktion des Bürostuhls für diese Bedingungen nicht ausreicht, da die Raumtemperatur bereits zu hoch ist und eine Erhöhung der Luftgeschwindigkeit im Stuhl nicht den gewünschten Kühleffekt zu erzielen vermag.

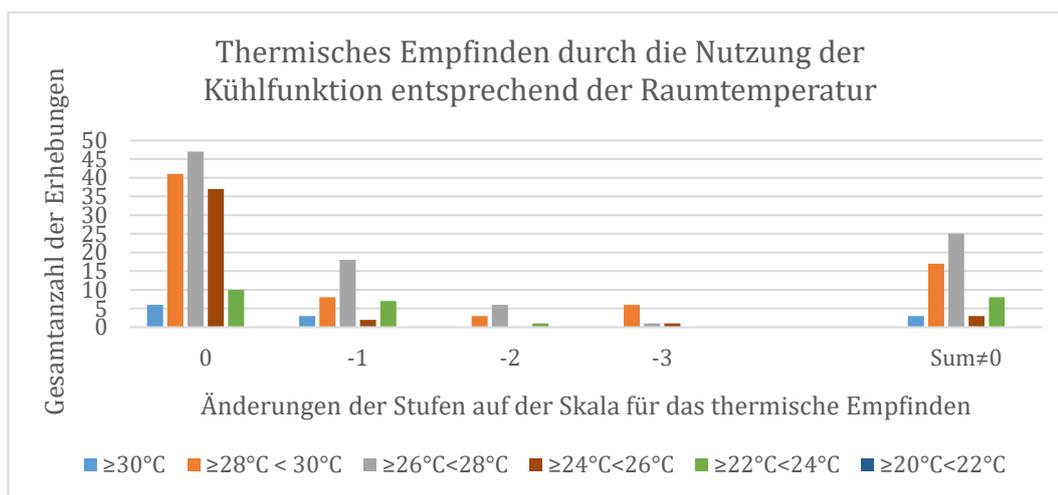


Abbildung 3-5: Thermisches Empfinden durch die Nutzung der Kühlfunktion entsprechend der Raumtemperatur aus der Feldstudie im Jahr 2016, Prototyp I der Stühle

Bei diesen Raumtemperaturen ist die Lufttemperatur bereits so hoch, dass kein Kühleffekt durch die Lüftungsfunktion mehr auftreten kann. Für solch warme Raumtemperaturen werden zusätzliche dezentrale Kühlsysteme empfohlen, wie beispielsweise ein Tischventilator. Auch in der Studie von Zhang et al. [87] wurde darauf hingewiesen, dass bei Temperaturen über 32 °C die Luft zusätzlich gekühlt werden muss, um einen Effekt auf die thermische Behaglichkeit erreichen zu können.

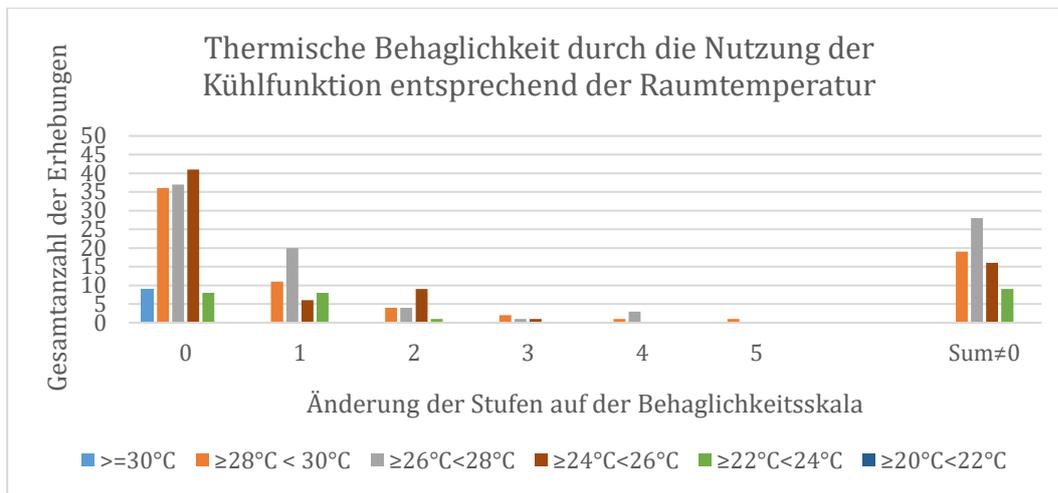


Abbildung 3-6: Thermische Behaglichkeit durch die Nutzung der Kühlfunktion entsprechend der Raumtemperatur aus der Feldstudie im Jahr 2015, Prototyp 1 der Stühle

In persönlichen Interviews wurde auf die Akzeptanz eingegangen. Die Ergebnisse dieser Befragungen können in drei Stichpunkten zusammengefasst werden:

- Es stellte für die Nutzer\*innen kein Problem dar, regelmäßig den Akku aufzuladen, da sich dieser Ablauf mehr oder weniger automatisiert.
- Häufig wurde die Lautstärke der Ventilatoren bemängelt. Diese Beobachtung wurde in mehreren Umfragen bestätigt. Das führte fälschlicherweise in einigen Umfragen zu einer negativen Bewertung der thermischen Behaglichkeit (dieser Sachverhalt trug zur Weiterentwicklung des Bürostuhls bei).
- Für einige Nutzer\*innen wurde die Kühlfunktion als zu kalt empfunden.

Die genannten Probleme wurden bei den weiterentwickelten Bürostühlen mit Heiz- und Kühlfunktion behoben. Mit diesen Bürostühlen wurde eine Studie im „Living Lab smart office space“ unter kontrollierten Bedingungen (Studie 2016) [114] durchgeführt.

### Studie 2016

Im Jahr 2016 wurde im „Living lab smart office space“ eine kontrollierte Studie mit zwei Gruppen durchgeführt [114]. Die Teilnehmer\*innen der Gruppe 1 konnten die Klimafunktionen beliebig nutzen, während Gruppe 2 als Kontrollgruppe diente und die Klimafunktionen nicht nutzen konnte.

Wie bereits in der vorherigen Studie wurden die genutzten Stuhlfunktionen wie Klimafunktion, Nutzungsdauer, Raumtemperatur und Luftfeuchtigkeit mitgeloggt. Alle Teilnehmer\*innen füllten während eines Testzyklus direkt zu Beginn, nach 5, nach 10 und nach 20 Minuten einen Umfragebogen zum thermischen Empfinden und der Behaglichkeit aus.

Die Ergebnisse der Studie von 2016 lassen sich in den folgenden zwei Diagrammen, einmal in die Nutzung der Kühlfunktion und einmal in die Nutzung der Heizfunktion zusammenfassen.

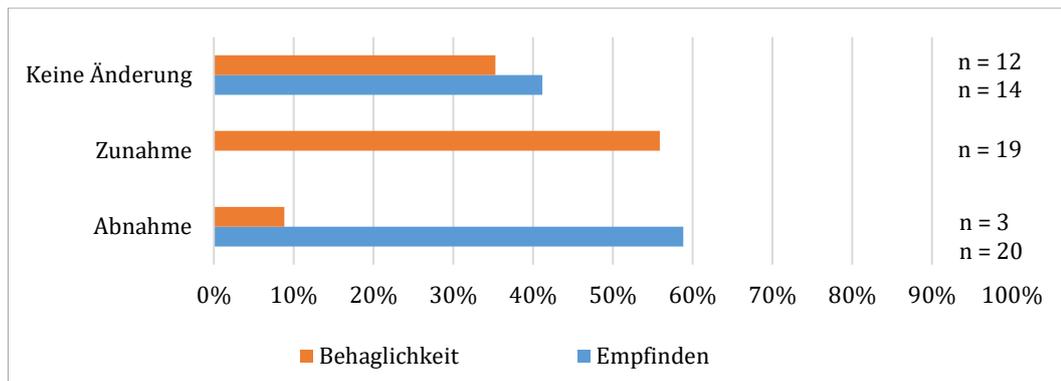


Abbildung 3-7: Steigerung und Abnahme des Empfindens und der Behaglichkeit durch die Nutzung der Kühlfunktion

Abbildung 3-7 zeigt die Ergebnisse bei Verwendung der Kühlfunktion. Es ist deutlich sichtbar, dass es durch die Nutzung der Kühlfunktion in fast 60 % der Fälle zu einer Abnahme des thermischen Empfindens (blau) kommt. In 56 % der Fälle führte dies zu einer Zunahme der thermischen Behaglichkeit (orange).

In 41 % der Fälle wurde keine Änderung des thermischen Empfindens und in 35 % der Fälle keine Änderung der thermischen Behaglichkeit beobachtet. In 9 % der Fälle kam es zu einer Abnahme der thermischen Behaglichkeit.

Abbildung 3-8 zeigt die Auswertung der Ergebnisse bei Verwendung der Wärmefunktion.

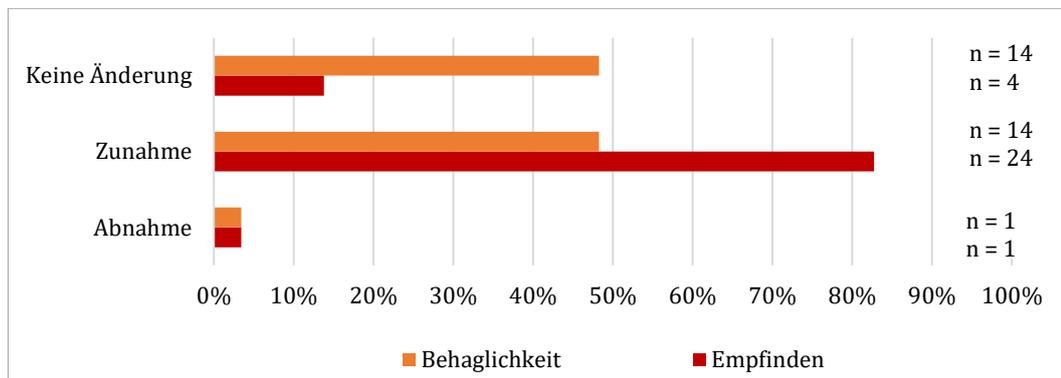


Abbildung 3-8: Steigerung und Abnahme des thermischen Empfindens und der thermischen Behaglichkeit durch die Nutzung der Wärmefunktion

Abbildung 3-8 zeigt die Ergebnisse bei Nutzung der Wärmefunktion des Stuhles. Hier konnte in knapp 82 % der Fälle das thermische Empfinden gesteigert werden, was in 49 % der Fälle zu einer Steigerung der Behaglichkeit führte. Die verhältnismäßig geringe Steigerung der Behaglichkeit könnte an den generell eher warmen Raumtemperaturen gelegen haben. In 48 % der Fälle blieben die Behaglichkeit und in 13 % das Empfinden konstant. In je 3 % der Fälle kam es zu einer Abnahme der thermischen Behaglichkeit und des thermischen Empfindens. Hier wurde möglicherweise falsch abgestimmt.

### 3.2.2 Mobile thermoelektrische Kühlwand

Eine Innovation im Bereich dezentraler Heiz- und Kühlsysteme ist die mobile thermoelektrische Kühlwand (Abbildung 3-9) [112, 117, 118].

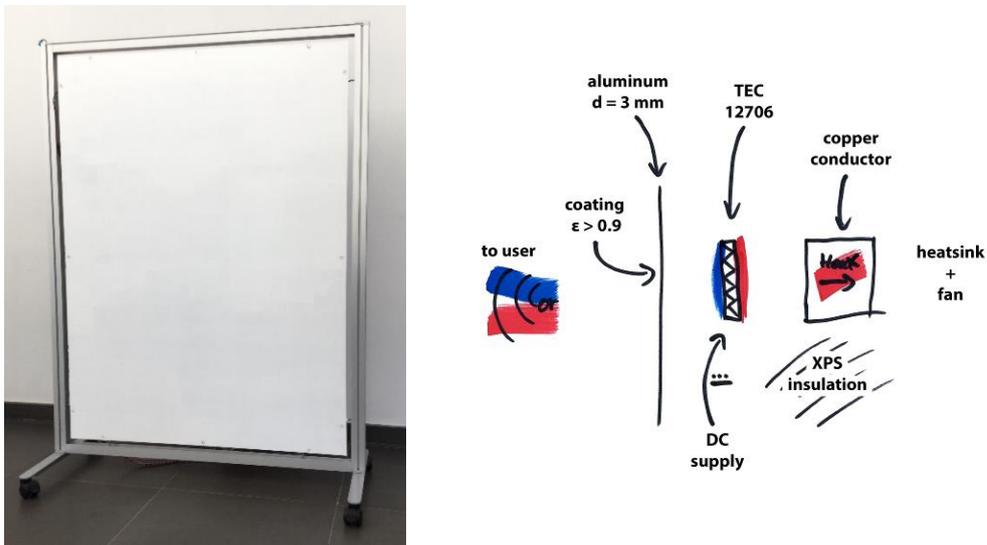


Abbildung 3-9: Erster-Prototyp und Skizze des Aufbaus der thermoelektrischen Stellwand aus [112]

Die mobile thermoelektrische Kühlwand nutzt den Peltier-Effekt. Der Peltier-Effekt entsteht durch Anlegen eines Stromflusses über zwei Halbleiter mit unterschiedlichen Energieniveaus. Dadurch wird die Vorderseite der Peltier-Elemente gekühlt, während die Abwärme zur Rückseite des Elementes abgeleitet wird (siehe Abbildung 3-9) [119].

Die Kühlung des Menschen erfolgt mit der Stellwand über Wärmestrahlung. Zwischen der kalten Stellwandoberfläche und der warmen Oberfläche des Menschen an Kleidung und Haut kommt es zu einem Wärmegefälle (Abbildung 3-10). Wärme wird über Wärmestrahlung von der Oberfläche des Menschen zur mobilen Stellwand geleitet.

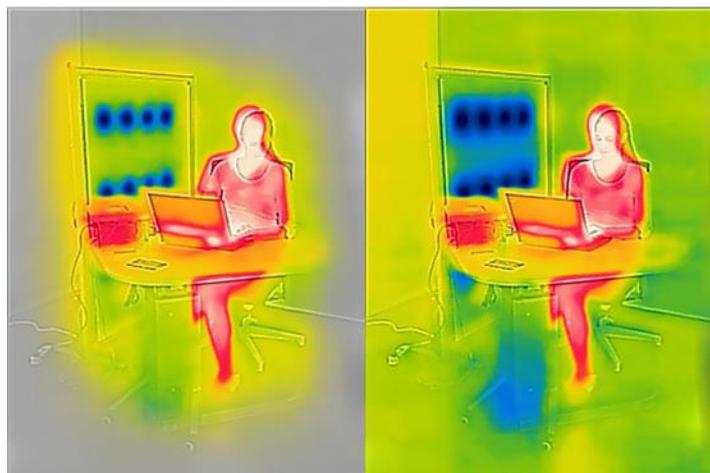


Abbildung 3-10: Thermoelektrische Kühlwand unmittelbar nach Einschalten (linke Abbildung) und während der Kühlphase (rechte Abbildung)

Ein weiterentwickelter Prototyp der Stellwand speichert Wärme in einem Phasenwechselmaterial (PCM – Phase Change Material). Phasenwechselmaterialien können während des Phasenwechsels (beispielsweise von fest zu flüssig) Wärme speichern und die Wärme zu einem späteren Zeitpunkt wieder abgeben.

Die thermoelektrische Kühlwand ist im Raum frei beweglich. Die Nutzer\*innen haben die Möglichkeit, die drei Zonen der Stellwand über eine Bedienoberfläche anzusteuern. Die Zonen teilen sich auf in eine Zone für den Kopfbereich, eine für den Bereich des Oberkörpers und eine für den Unterkörper. Die Abmessungen der Stellwand berücksichtigen einen sitzenden Menschen [112].

Die Kühlfunktion der thermoelektrischen Kühlwand wurde in verschiedenen Studien validiert [117, 118]. In einer ersten Studie wurden die Hauttemperaturen der Probanden/innen gemessen. Mithilfe des Physiologie- und „Sensation and Comfort“ Modells wurde das thermische Empfinden berechnet. In einem weiteren Schritt wurde das „Corrective Delta“ durch die Nutzung von Thekla ermittelt [117].

Eine andere Studie [120] testete die zwei Typen der thermoelektrischen Heiz- und Kühlwand einerseits mit PCM Speicher und andererseits mit Wasserkühlung in Probandenversuchen. Die Studie bestätigte die Kühlwirkung der thermoelektrischen Stellwand. Im Allgemeinen lag das thermische Empfinden in der Kühlphase mit thermoelektrischer Kühlwand unter dem thermischen Empfinden in den Phasen ohne thermoelektrische Kühlwand.

### 3.3 Berücksichtigung von dezentralen Heiz- und Kühlsystemen in der Gebäudesimulation

Beim Studieren der in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Ansätze von Physiologie-Modellen, thermischen Behaglichkeitsmodellen, Physiologie- und thermischen Behaglichkeitsmodellen in der Gebäudesimulation und dezentralen Systemen zur Behaglichkeitssteigerung fällt auf, dass nur wenige Modelle innerhalb der Gebäudesimulation genutzt werden. Eine Nutzung von dezentralen Systemen in der Gebäudesimulationssoftware oder innerhalb einer Regelungslogik fehlt gänzlich.

Die Gebäudesimulationsprogramme, die eine Implementierung von Behaglichkeitsmodellen vorweisen, werden nicht dazu genutzt, die Raumtemperaturen nach dem Empfinden und je nach vorliegender Behaglichkeit zu regulieren, was jedoch ein naheliegender Ansatz ist, um 1.) Die Behaglichkeit der Raumnutzer\*innen zu erhöhen und 2.) Den Energiebedarf der zentralen Heiz- und Kühlanlage zu reduzieren. Dies sollte schon bei der Gebäudeplanung berücksichtigt werden.

Das üblicherweise angewandte Modell von Fanger (PMV) ist ungeeignet, asymmetrische Bedingungen zu vergleichen, wie sie beispielsweise durch eine Glasfassade oder Strahlungsheizung entstehen können und die komplexen klimatischen Verhältnisse in Gebäuden richtig zu bewerten. Ungleichmäßige Temperaturzonen wirken sich auf den im Raum sitzenden Menschen aus und können lokale (Un)Behaglichkeit auslösen, die zu einer weiteren globalen Unbehaglichkeit des Menschen führen. Die dezentralen Systeme

können solche lokalen Unbehaglichkeiten ausgleichen und zu einer höheren thermischen Behaglichkeit führen.

Dies kann somit auch in der Nutzung der zentralen Heiz- und Kühlanlagen mitberücksichtigt werden, damit deren Einsatz limitiert werden kann. Die dezentralen Systeme werden selektiv nur dort wo sie unmittelbar gebraucht werden, eingesetzt. Sie weisen einen wesentlich geringeren Energiebedarf auf.

Ein detailliertes Modell, welches lokale Körperteile unterscheiden kann, ist hier von Vorteil und wird für die Bewertung von klimatischen Raumverhältnissen, vor allem mit Strahlungsasymmetrien, empfohlen. Diese Strahlungsasymmetrien können beispielhaft durch den Einfluss von Glasfassaden oder einer Strahlungsheizung entstehen. Auch der Einsatz von dezentralen Systemen erfordert ein detailliertes Behaglichkeitsmodell, um den Einsatz dieser Systeme richtig planen und zu aussagekräftigen Ergebnissen führen zu können.

Die dezentralen Systeme können neben der Steigerung der Behaglichkeit einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung der genutzten Energie durch die zentralen Heiz- und Kühlanlagen leisten.

Es existiert kein Gebäuderegler, der die Temperatur in Gebäuden auf der Grundlage lokaler Werte für das thermische Empfinden und die thermische Behaglichkeit regelt. Und es liegt außerdem kein Programm vor, das eine Regelungslogik dezentraler Systeme berücksichtigt, die auf der Basis der lokalen Empfindungswerte agieren kann.

Die Arbeit hat das Anliegen, ein bereits gekoppeltes Physiologie- und Behaglichkeitsmodell (PhySCo) zusätzlich mit der Gebäudesimulationssoftware Esp-r zu koppeln und damit einen neuen adaptiven Gebäuderegler zu erstellen. Dieser dient zum einen der Erfassung des Menschen in der Gebäudesimulation, um detaillierte Werte über die Behaglichkeit des Menschen zu erhalten. Zum anderen soll der Regler basierend auf den Behaglichkeitswerten die zentrale Heiz- und Kühlanlage über eine Sollwertadaption steuern. Die dezentralen Heiz- und Kühlsysteme sollen eine zusätzliche Unterstützung der zentralen Heiz- und Kühlsysteme zur Behaglichkeitssteigerung leisten.

## 4 PhySCo – “Physiology, Sensation and Comfort” Modell

PhySCo steht für „**Physiology, Sensation and Comfort**“. Dieses Modell beschreibt die Kopplung zwischen einem Physiologie-, einem Empfindlichkeits- und einem Behaglichkeits-Modell mit dem Ziel, das thermische Empfinden und die Behaglichkeit des Menschen in einer Gebäudeumgebung zu berechnen.

Das thermische Empfinden definiert ein subjektives Gefühl im Hinblick auf die Temperaturempfindung, beispielsweise warm, kalt oder neutral. Die thermische Behaglichkeit beschreibt daraus resultierend die Zufriedenheit oder Unzufriedenheit mit der thermischen Umgebung.

PhySCo kann autonom also alleinig oder innerhalb einer Gebäudesimulationssoftware genutzt werden. Der Vorteil von PhySCo liegt darin, dass das Programm in der Lage ist, für 16 einzelne Körpersegmente lokale Hauttemperaturen, Empfindungs- und Behaglichkeitswerte zu berechnen. Somit grenzt sich PhySCo von vielen Modellen zur Behaglichkeitsberechnung ab und macht es zu einem universell einsetzbaren Modell für transiente und asymmetrische Umgebungsbedingungen.

In diesem Kapitel wird der Aufbau von PhySCo, gegliedert in die Hauptbestandteile des Physiologie-Modells und des „Sensation and Comfort“-Modells beschrieben. In der Folge werden die Simulationsergebnisse präsentiert.

### 4.1 Physiologie-Modell

Das Thermophysiologie-Modell basiert auf Arbeiten von Stolwijk [49], Tanabe [61],[51], Huizenga [50] und Hoffmann [100].

#### 4.1.1 Besonderheiten des Modells

Das Physiologie-Modell simuliert die thermophysiologischen Vorgänge inklusive der Wärmetransportvorgänge und des Wärmeaustausches des Körpers mit seiner direkten thermischen Umgebung. Es berücksichtigt sowohl transiente als auch asymmetrische Umgebungsbedingungen.

Das Modell setzt sich aus einem aktiven und einem passiven Kontrollsystem zusammen. Die Thermorezeptoren der Haut und der Hypothalamus repräsentieren das aktive Kontrollsystem, die 16 Körpersegmente das passive System.

Die 16 Körpersegmente sind in jeweils vier Schichten unterteilt: Körperkern, Muskel- und Fettschicht sowie die Haut. Die einzelnen Körperteile und Schichten werden über 64 Knoten dargestellt (Tabelle 4-1). Für jeden Knoten wird eine Wärmebilanzgleichung erstellt, sodass die Temperaturen der einzelnen Schichten und der jeweiligen Körperteile pro Simulationszeitschritt berechnet werden können.

Der Wärmeaustausch erfolgt innerhalb eines Körperteils von einer Schicht zur nächsten über Wärmeleitung. Die einzelnen Körperteile tauschen die Wärme über Blutfluss

mittels konvektiven Wärmeübergangs aus. Der Blutfluss wird durch einen weiteren Knotenpunkt repräsentiert, sodass das Modell insgesamt 65 Knoten aufweist.

Tabelle 4-1 beschreibt den Aufbau der 65 Knoten, die sich aus den Knotenpunkten der 16 Körperteile (i), der jeweiligen 4 Schichten (j) und des Blutflussknotens zusammensetzen.

*Tabelle 4-1: Nummerierung der einzelnen Knoten je Körperteil (i) und Schicht (j)*

SEGMENT		KERN	MUSKEL	FETT	HAUT
1	Kopf	1	2	3	4
2	Brustbereich	5	6	7	8
3	Rücken	9	10	11	12
4	Hüfte	13	14	15	16
5	Linker Oberarm	17	18	19	20
6	Rechter Oberarm	21	22	23	24
7	Linker Unterarm	25	26	27	28
8	Rechter Unterarm	29	30	31	32
9	Linke Hand	33	34	35	36
10	Rechte Hand	37	38	39	40
11	Linker Oberschenkel	41	42	43	44
12	Rechter Oberschenkel	45	46	47	48
13	Linker Unterschenkel	49	50	51	52
14	Rechter Unterschenkel	53	54	55	56
15	Linker Fuß	57	58	59	60
16	Rechter Fuß	61	62	63	64
	Blutknoten	65			

Das Physiologie-Modell berücksichtigt die metabolische Wärmeproduktion durch Stoffwechsel, erhöhte Muskelaktivität und Wärmeproduktion durch Zittern. Weiterhin werden die wärmeregulierenden Mechanismen wie Vasodilatation, Vasokonstriktion und Schwitzen berücksichtigt.

Das Physiologie-Modell kann asymmetrische Umgebungsbedingungen berücksichtigen, wie die kurzweilige Solarstrahlung, den langwelligen Strahlungsaustausch (siehe Kapitel 2.2), den konvektiven Wärmeübergang und die Wärmeleitung.

Der konvektive Wärmeübergang, der Energietransport über Teilchen in flüssigen oder gasförmigen Medien erfolgt im Physiologie-Modell einerseits über den Blutfluss und andererseits über die Verdunstung von Feuchtigkeit an der Hautoberfläche.

Die Wärmeleitung ist der Wärmeaustausch innerhalb von Festkörpern ohne Stofftransport. Dieser wird im Physiologie-Modell innerhalb der Körperteile von einer

Schicht zur benachbarten berücksichtigt. Auf den nächsten Seiten werden die Mechanismen im Detail beschrieben.

### Eingangsparameter des Modells

Das Physiologie-Modell greift auf eine Vielzahl unterschiedlicher Dateien zu, die Informationen über die einzelnen Körperteile enthalten (Tabelle 4-2).

Zur Berechnung der Haut- und Kerntemperaturen benötigt das Modell zum einen die Informationen über die wechselnden thermischen Umgebungsbedingungen und zum anderen die Informationen über die persönlichen Parameter (Abbildung 4-1).

Die persönlichen Parameter betreffen die Bekleidung und das Aktivitätslevel, das den Grundumsatz des Menschen beeinflusst (2.3.1). Die Umgebungsbedingungen (2.2) wie mittlere Strahlungstemperatur, Raumtemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Luftbewegung und kurzweilige Solarstrahlung sind ebenfalls für die Ermittlung der Haut- und Kerntemperaturen relevant. Abbildung 4-1 zeigt die für das Physiologie-Modell notwendigen Eingabeparameter und die resultierenden Ausgabewerte.

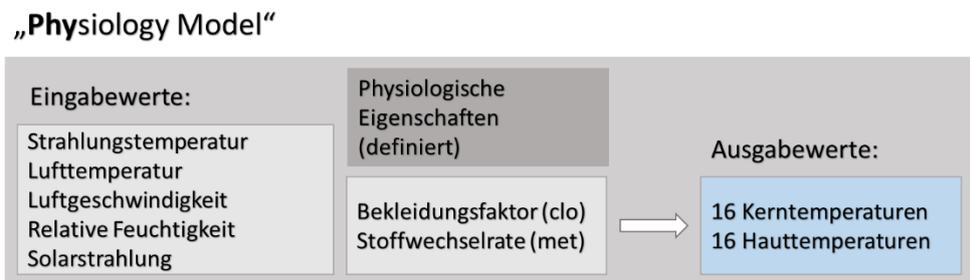


Abbildung 4-1: Notwendige Eingabeparameter des Physiologie-Modells (Physiology Model) um die 16 Haut- und Kerntemperaturen zu berechnen

Das Physiologie-Modell kann mithilfe dieser Eingabeparameter verschiedene Aktivitäts- und Umgebungsphasen berücksichtigen. Die verschiedenen Phasen können aufeinanderfolgen und somit einen zeitlichen Ablauf, beispielsweise Fahrt mit dem Auto, Gang zum Büro, Arbeit im Büro darstellen. Hierbei werden die Umgebungsbedingungen, Dauer der jeweiligen Phase, Grundumsatz und der Bekleidungsgrad an die jeweilige Phase angepasst.

#### 4.1.2 Passives System

Das passive System repräsentiert den Körper mit den 16 Körperteilen und dem detaillierten Aufbau der Körperteile (Tabelle 4-2).

Dem passiven System zugeordnet sind die Gleichungen zur Wärmeproduktion, zur Wärmeleitung zwischen den vier Schichten (Kern, Muskel, Fett und Haut) und dem Wärmeaustausch über die einzelnen Körpersegmente durch das Blut. Jedes der 16 Körperteile steht über Konvektion, Wärmestrahlung, Evaporation und Wärmeleitung im Wärmeaustausch mit der Umgebung.

Tabelle 4-2: Repräsentation der Dateien des passiven Systems

<b>Datei</b>	<b>Name</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Anzahl</b>
surf.txt	Oberflächen	Oberfläche je Körperteil [ $m^2$ ]	16
tset.txt	Knoten Sollwerte	Sollwerte der Knotenpunkte ( $^{\circ}C$ )	65
control.txt	Koeffizienten des Steuerungssystems	16 Koeffizienten (unabhängig von den 16 Körperteilen)	16
hr.txt	Strahlungswärmeübertragungskoeffizienten	Strahlungswärmeübertragungskoeffizienten für jedes Körpersegment ( $W/m^2 \text{ } ^{\circ}C$ )	16
Woodcock.txt	Woodcock Faktor	Feuchtigkeitsdurchlässigkeitsindex, $i_{cl}$ der Kleidung	16
cap.txt	Wärmekapazitäten	Wärmekapazität für jeden Knoten ( $Wh/^{\circ}C$ )	65
conduct.txt	Wärmeleitfähigkeit	Wärmeleitfähigkeit für jeden Knoten ( $W/^{\circ}C$ )	65
basalmet.txt	Stoffwechselgrundumsatz	Grundumsatz für jeden Knoten ( $W$ )	65
metf.txt	Verteilung der Stoffwechselrate	Anteil der Körperarbeitswärme, die in jedem Muskelknoten eines jeden Segments erzeugt wird.	16
chilf.txt	Verteilung der „Zitterrate“	Anteil der Körperzitterwärme, die in jedem Muskelknoten eines jeden Segments erzeugt wird.	16
blood.txt	Blutfluss	Basale Blutstromrate zu jedem Knoten ( $l/hr$ )	65
rate.txt	dynamische Empfindlichkeit Thermorezeptoren	Dynamische Empfindlichkeit der Thermorezeptoren in jedem Knoten ( $hr^{-1}$ )	65
skinv.txt	Verteilungsrate Vasodilatation	Anteil von VASODILATATION, die auf den Hautknoten jedes Segments anwendbar ist.	16
skinc.txt	Verteilungsrate Vasokonstriktion	Anteil von VASOCONSTRICT, der auf den Hautknoten jedes Segments anwendbar ist.	16
skins.txt	Verteilungsrate Schwitzen	Der Anteil des Schwitzens ist auf den Hautknoten jedes Segments anwendbar.	16
skinr.txt	Verteilung der kutanen Thermorezeptoren	Anteil der kutanen Thermorezeptoren im Hautknoten jedes Segments	16
Ia clo.txt	Clo-Werte der Luftschicht	Clo-Wert der Luftschicht auf jedem Segment (clo)	16

### Wärmeproduktion der vier Schichten – Thermogenese

Die Wärmeproduktion erfolgt durch die metabolische Wärmeproduktion  $Q_b(i, j)$  (Tabelle 10-3).

$$Q_{Kern}(i) = Q_{b,Kern}(i) \quad (4-1)$$

$$Q_{Muskel}(i) = Q_{b,Muskel}(i) + W_{Muskel}(i) + Chilf(i) * CHILL \quad (4-2)$$

Innerhalb der Muskelschicht werden Energiegewinne durch metabolische Wärmeproduktion  $Q_{b,Muskel}$  durch die externe Arbeit  $W_{Muskel}$  und durch Kältezittern (CHILL) berücksichtigt (Gleichung 4-2). Chilf (Tabelle 10-2) beschreibt die mögliche „Verteilungsrate“ des Kältezitterns in Bezug auf die einzelnen Körperteile. Zittern (CHILL) wird durch das aktive System bestimmt (siehe Gleichung 4-29).

$$W_{Muskel}(i) = (met - Q_b) * 58.2 * Sarea * metf(i) \quad (4-3)$$

Die externe Arbeit  $W_{Muskel}$  berücksichtigt das Aktivitätslevel als metabolisches Äquivalent (met), die metabolische Wärmeproduktion des ganzen Körpers ( $Q_b$ ) (Tabelle 10-3), den Ruhe-Gundumsatz mit 58,2 W/m<sup>2</sup>, die Körperteiloberfläche  $S_{area}$  (Tabelle 10-3) und den Faktor metf. Metf repräsentiert die Verteilung der Stoffwechselrate bezogen auf die Körperteile (Tabelle 10-2).

$$Q_{Fett}(i) = Q_{b,Fett}(i) \quad (4-4)$$

$$Q_{Haut}(i) = Q_{b,Haut}(i) \quad (4-5)$$

### Konvektive Wärmeübertragung über das Blut

Die konvektive Wärmeübertragung über den Blutfluss (BC) wird über die Temperaturdifferenz zwischen dem aktuellen Knoten und dem zentralen Blutknoten abgebildet. Die basale Blutstromrate (Bf) kann für jeden Knoten aus (Tabelle 10-3) abgelesen werden.

$$BC(i, j) = Bf(i, j) * (T(i, j) - T_{Blut}) \quad (4-6)$$

Der Blutfluss innerhalb der Hautschicht wird mit folgender Gleichung berechnet.

$$Bf_{Haut}(i) = \left( \frac{Bf_{b,Haut}(i) + SKINV(i) * DILAT}{1 + SKINC(i) * STRIC} \right) * 2^{(ESIGNAL_{Haut}(i) / 10.0)} \quad (4-7)$$

Die Verteilungsanteile für Vasodilatation (SKINV) und Vasokonstriktion (SKINC) für die einzelnen Körperteile werden aus den entsprechenden Tabellen (Anhang A) entnommen, während DILAT und STRIC innerhalb des aktiven Systems festgelegt werden.

### Wärmeleitung

Der Wärmeaustausch über Wärmeleitung ( $Cd$ ) zwischen den einzelnen Schichten eines Körperteils ergibt sich aus den Komponenten der thermischen Leitfähigkeit  $Cond$  (Tabelle 10-3) zwischen einer Schicht und deren Nachbarschicht und den entsprechenden Oberflächentemperaturen der zwei Schichten.

$$Cd(i, j) = Cond(i, j) * (T(i, j) - T(j + 1)) \quad (4-8)$$

### Berechnung der Wärmeverluste der Haut

Unter Berücksichtigung des maximalen Sättigungsdrucks der Umgebung ( $P_a$ ) und des maximalen Sättigungsdrucks an der Haut ( $P_s$ ) können im Anschluss die maximalen Wärmeverluste durch Evaporation ( $E_{max}$ ) berechnet werden.

$$E_{max}(i) = (P_s(i) - P_a(i)) * h_e(i) * Surf(i) \quad (4-9)$$

Zur Berechnung der maximalen Wärmeabgabe  $E_{max}$  durch Evaporation ist neben dem maximalen Sättigungsdruck an der Haut ( $P_s$ ) und dem Dampfdruck der Umgebung ( $P_a$ ) auch der Verdunstungs-Wärmeübertragungskoeffizient ( $h_e$ ) zu berücksichtigen.

$$h_e(i) = \frac{1}{REA(i) + RECL(i)} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right] \quad (4-10)$$

Der Verdunstungs-Wärmeübertragungskoeffizient  $h_e$  setzt sich aus den Anteilen der latenten Wärmeleitfähigkeit der Bekleidung zur Umgebung ( $REA$ ) und der latenten Wärmeleitfähigkeit der Hautoberfläche zur Bekleidungsfläche ( $RECL$ ) zusammen.

Die latente Wärmeleitfähigkeit der Bekleidung zur Umgebung ( $REA$ ) wird mit dem Lewis Faktor ( $L_r$ ), dem Bekleidungsflächenfaktor ( $f_{cl}$ ) und dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten ( $h_c$ ) berechnet. Der Lewis Faktor wird für Innenraumbedingungen mit einem konstanten Wert von 16,5 K/kPa [39] angegeben (Kapitel 2.3.1).

$$REA(i) = \frac{1}{(L_r * f_{cl}(i) * h_c(i))} \left[ \frac{m^2 Pa}{W} \right] \quad (4-11)$$

Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient ( $h_c$ ) berücksichtigt den Wärmeübergangskoeffizienten  $h(i)$  und den Strahlungswärmeübergangskoeffizienten ( $h_r$ ).

Der Strahlungswärmeübergangskoeffizient kann in Innenräumen als nahezu konstant angesehen werden und wird mit einem Wert von  $h_r = 4.7 \frac{W}{m^2}$  angesetzt [35].

$$h_c = h(i) - h_r(i) [W/m^2 \cdot ^\circ C] \quad (4-12)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient  $h(i)$  berücksichtigt den Bekleidungsisolationsfaktor der Grenzluftschicht zwischen Hautoberfläche und Bekleidung ( $I_a$ ) (siehe Kapitel 2.3.1).

$$h(i) = \frac{1}{(0.155 * I_{cl}(i))} [W/m^2 \cdot ^\circ C] \quad (4-13)$$

Der gesamte Wärmeübergangskoeffizient ( $h_i$ ) für bekleidete Personen berücksichtigt die Bekleidungsisolations ( $I_{cl}$ ) und fließt in die Berechnung der sensiblen Wärmeverluste der Haut ein.

$$h_t(i) = \frac{1}{\left(\frac{1}{h(i) * f_{cl}(i)}\right) + 0.155 * I_{cl}(i)} [W/m^2 \cdot ^\circ C] \quad (4-14)$$

Die latente Wärmeleitfähigkeit von der Hautoberfläche zur Bekleidungsfläche wird nach der folgenden Formel berechnet.

$$RECL(i) = 0.155 * \frac{I_{cl}(i)}{i_{cl}(i) * L_r} [m^2 Pa/W] \quad (4-15)$$

Bei der latenten Wärmeleitfähigkeit von der Hautoberfläche zur Bekleidungsfläche wird der Feuchtigkeitspermeabilitäts-Index  $i_{cl}$  (siehe Kapitel 2.3.1) der Bekleidung berücksichtigt [38].

Die latenten Wärmeverluste der Haut  $E_{Haut}$  teilen sich in Wärmeverluste durch Evaporation (ERSW) und in solche durch Diffusion (EDIF).

Die Wärmeverluste durch Evaporation werden mit der folgenden Gleichung berechnet.

$$ERSW(i) = (SKINS(i) * SWEAT) * 2^{\left(\frac{WARM_{Haut}(i)}{BULL}\right)} \quad (4-16)$$

Die Faktoren SKINS und SWEAT bestimmen die für die Evaporation benötigte „Schweißmenge“ und basieren auf den Gleichungen des aktiven Systems. Die Faktoren WARM und BULL können (Tabelle 10-1) entnommen werden.

Die Berechnung der Wasserdampfdiffusion durch die Haut erfolgt folgendermaßen.

$$EDIF(i) = 0.06 * \left(1 - \frac{ERSW(i)}{E_{max}(i)}\right) * E_{max}(i) \quad (4-17)$$

Im Anschluss können die latenten Wärmeverluste durch die Haut berechnet werden.

$$E_{Haut}(i) = ERSW(i) + EDIF(i) \quad (4-18)$$

### Wärmeverluste durch Atmung

Die Wärmeverluste durch Atmung ( $Res$ ) treten nur in einem Knoten, im Kern des Brustbereichs auf. Sie werden in latente ( $E_{res}$ ) und sensible ( $C_{res}$ ) Wärmeverluste unterschieden (Kapitel 2.3.1).

$$Res = C_{res} + E_{res} \quad (4-19)$$

$$E_{res} = 0.017 * (5.867 - Pa(Kopf)) * Met * Sarea \quad (4-20)$$

$$C_{res} = 0.0014 * (T_{Kern}(Brust) - Top(Kopf)) * Met * Sarea \quad (4-21)$$

### 4.1.3 Aktives System

Das aktive System repräsentiert die wärmereregulierenden Kontrollorgane des Körpers. Zusammen mit den Informationen der Thermorezeptoren und dem Abgleich der internen Sollwerte für jeden Knoten berechnet es die Fehlersignale, die im Anschluss in die ausführenden Kontrollgleichungen für Schwitzen, Zittern, Gefäßerweiterung (Vasodilatation) und Gefäßverengung (Vasokonstriktion) einfließen.

#### Berechnung der Fehlersignale

Im aktiven System erfolgt zunächst die Berechnung der Fehlersignale. Hierzu werden die Signale der Thermorezeptoren (ESIGNAL) aus der Differenz der aktuellen lokalen Temperaturen  $T(i, j)$  und der lokalen Sollwerte  $T_{set}(i, j)$  ermittelt (Tabelle 10-3 Anhang A).

$$ESIGNAL(i, j) = T(i, j) - T_{set}(i, j) \quad (4-22)$$

Dabei werden die Signale „Kalt“ und „Warm“ definiert.

$$ESIGNAL(i, j) < 0 \rightarrow \begin{cases} Kalt(i, j) = ESIGNAL(i, j) \\ Warm(i, j) = 0 \end{cases} \quad (4-23)$$

$$ESIGNAL(i, j) > 0 \rightarrow \begin{cases} Kalt(i, j) = 0 \\ Warm(i, j) = ESIGNAL(i, j) \end{cases} \quad (4-24)$$

$$ESIGNAL(i, j) = 0 \rightarrow \begin{cases} Kalt(i, j) = 0 \\ Warm(i, j) = 0 \end{cases} \quad (4-25)$$

Die Signale „Kalt“ und „Warm“ fließen in die zentralen Signale (KALTs, WARMs) ein, in denen die Verteilung der Warm- und Kaltrezeptoren (Skinr) in der Haut berücksichtigt wird (Anhang A).

$$KALTs = \sum_{i=1}^{16} Kalt_{i,4} * Skinr_{(i)} \quad (4-26)$$

$$WARMs = \sum_{i=1}^{16} Warm_{i,4} * Skinr_{(i)} \quad (4-27)$$

Die Fehlersignale dienen der Steuerung der aktiven Regelungsmechanismen wie Schwitzen, Zittern, Gefäßerweitern und Gefäßverengung.

#### Berechnung der Kontrollmechanismen

Die wärmereregulierenden Kontrollsignale Schwitzen (SWEAT), Zittern (CHILL), Gefäßerweiterung (DILAT) und Gefäßverengung (STRIC) ergeben sich aus den folgenden Gleichungen.

Tabelle 10-1 (Anhang A) zeigt die für das Kontrollsystem notwendigen Koeffizienten.

$$SWEAT = C_{sw} * ESIGNAL(1,1) + S_{sw} * (WARMs - KALTs) + P_{sw} * WARM(1,1) * WARMs \quad (4-28)$$

$$CHILL = -C_{chil} * ESIGNAL(1,1) - S_{chil} * (WARMs - KALTs) + P_{chil} * KALT(1,1) * KALTs \quad (4-29)$$

$$DILAT = C_{dil} * ESIGNAL(1,1) + S_{dil} * (WARMs - KALTs) + P_{dil} * WARM(1,1) * WARMs \quad (4-30)$$

$$STRIC = -C_{con} * ESIGNAL(1,1) - S_{con} * (WARMs - KALTs) + P_{con} * KALT(1,1) * KALTs \quad (4-31)$$

Mit den Kontrollsignalen werden sowohl die Wärmeübertragungsmechanismen als auch die thermoregulatorischen Prozesse für die einzelnen Körperteile berechnet.

### Berechnung der Energiebilanzgleichungen

Im nächsten Schritt werden die Wärmebilanzgleichungen für alle Knoten berechnet.

Wärmebilanzgleichung für den Blutknoten:

$$C_{Blut} \frac{dT_{Blut}}{dt} = \sum_{i=1}^{16} (BC_{Kern}(i) + BC_{Muskel}(i) + BC_{Fett}(i) + BC_{Haut}(i)) \quad (4-32)$$

Wärmeverlust durch Atmung für den Kernknotenpunkt des Brustbereichs (Knoten 5):

$$C_{Kern}(i) \frac{dT_{Kern}(i)}{dt} = Q_{Kern}(i) - BC_{Kern}(i) - Cd_{Kern}(i) - Res(Brust) \quad (4-33)$$

Wärmebilanzgleichung für die Muskelschicht.

$$C_{Muskel}(i) \frac{dT_{Muskel}(i)}{dt} = Q_{Muskel}(i) - BC_{Muskel}(i) + Cd_{Kern}(i) - Cd_{Muskel}(i) \quad (4-34)$$

Wärmebilanzgleichung für die Fett-Schicht:

$$C_{Fett}(i) \frac{dT_{Fett}(i)}{dt} = Q_{Fett}(i) - BC_{Fett}(i) + Cd_{Muskel}(i) - Cd_{Fett}(i) \quad (4-35)$$

Die Gesamtwärmeverluste an der Hautoberfläche setzen sich aus den sensiblen Wärmeverlusten und aus den Verlusten durch Evaporation (siehe Kapitel 2.3.1) zusammen.

$$C_{Haut}(i) \frac{dT_{Haut}(i)}{dt} = Q_{Haut}(i) - BC_{Haut}(i) + Cd_{Fett}(i) - ht(i) * (T_{Haut}(i) - T_{eq}(i)) * Surf(i) - E_{Haut}(i) + Solar(i) \quad (4-36)$$

## 4.2 Behaglichkeitsmodell „Sensation and Comfort Model“

Das in dieser Arbeit genutzte „Sensation and Comfort Model“ im Rahmen von PhySCo basiert auf den Gleichungen von Zhang Hui [77–79] und Zhao [121].

Das Behaglichkeitsmodell berechnet, basierend auf den 16 Körperteilen des Physiologie-Modells, lokale und globale Empfindungs- und Behaglichkeitswerte.

Grundsätzlich teilt sich das Modell in mehrere Berechnungsschritte auf (Abbildung 4-2).

1. Berechnung des lokalen Empfindens der 16 Körperteile
2. Berechnung des globalen Empfindens des gesamten Körpers
3. Berechnung der lokalen Behaglichkeit der 16 Körperteile
4. Berechnung der globalen Behaglichkeit des gesamten Körpers

Das Modell ist ein fortschrittliches Behaglichkeits-Modell, welches einzelne Körpersegmente beachtet und zusätzlich in der Lage ist, sowohl unsymmetrische als auch transiente Umgebungen zu simulieren.

Es berücksichtigt, schnelle Temperaturänderungen durch die Beachtung der Derivativen von Haut- und Kerntemperaturen und der Wärmespeicherfähigkeit zu berücksichtigen, sodass eine dynamische Abbildung erfolgen kann. Bei abrupt fallender Hauttemperatur fühlt sich eine Person zum Beispiel kühler, als wenn die Hauttemperatur auf einem niedrigen Level stagniert. Das Modell kann verschiedene Stoffwechselraten (Grundumsatz) im Rahmen von Büroaktivitäten berücksichtigen.

Mit den Ausgabewerten der 16 lokalen Haut- und Kerntemperaturen des Physiologie-Modells werden die lokalen Empfindungswerte berechnet. Diese sind Basiswerte, um das globale Empfinden und die lokale Behaglichkeit zu berechnen, und letztere wiederum dienen als Grundlage zur Berechnung der globalen Behaglichkeit (siehe Abbildung 4-2).

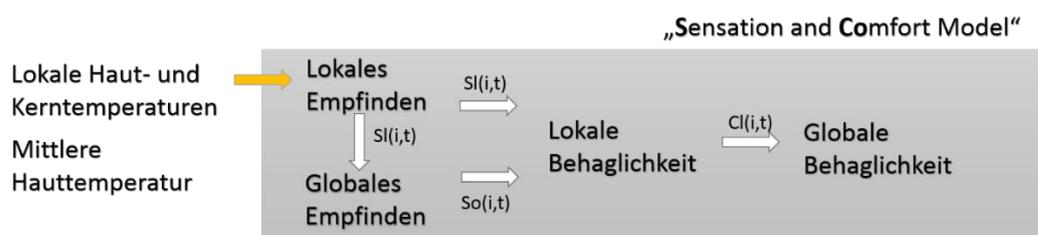


Abbildung 4-2: Vereinfachter Ablauf innerhalb des „Sensation and Comfort Model“

Das Modell wurde über mehrere Jahre mithilfe von Klimakammer-Experimenten entwickelt. Während der Versuche wurden ständig sowohl das lokale und globale Empfinden als auch die lokale und globale Behaglichkeit abgefragt. In den Studien wurden die Koeffizienten des Modells ermittelt und bei weiteren Tests validiert [77–79].

Hui Zhang nutzte bei der Entwicklung des Modells eine Skala zur Bewertung des thermischen Empfindens [77]. Basierend auf der 7-Punkte Skala von ASHRAE [20]

wurden von Zhang zwei weitere Bewertungspunkte hinzugefügt, sodass hier eine 9-Punkte-Skala vorliegt (Abbildung 4-3). Die Skala des subjektiven Empfindens erstreckt sich von „sehr kalt“ bis „sehr heiß“ dazwischen liegt ein „neutraler Punkt“.

Die thermische Behaglichkeit spiegelt die Zufriedenheit des Menschen mit der thermischen Umgebung. Die Skala reicht von sehr unbehaglich bis sehr behaglich. Im Gegensatz zur Skala zum thermischen Empfinden liegt kein neutraler Punkt vor, da sich ein Mensch entweder nur im Bereich der Behaglichkeit oder der Unbehaglichkeit mit graduellen Unterschieden einordnet. Diese beiden Skalen sind Grundlage dieser Arbeit (Abbildung 4-3).

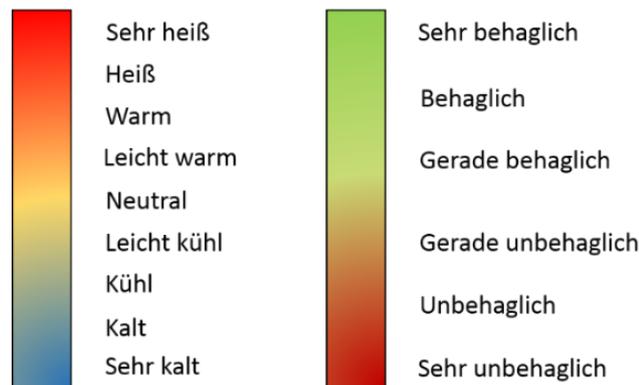


Abbildung 4-3: Skalen zur Bewertung des thermischen Empfindens (links) und der thermischen Behaglichkeit (rechts)

#### 4.2.1 Lokales Empfinden

Die einzelnen Körperteile reagieren unterschiedlich empfindlich auf Hitze- und Kälteeinwirkung, sodass sich das lokale Empfinden der einzelnen Körperteile voneinander unterscheiden kann. Es gibt einige Körperregionen wie der Rücken-, Brust- und Hüftbereich, die sehr empfindlich auf Kälte reagieren. Andere Körperteile, beispielsweise der Kopf, reagieren empfindlich auf Hitze. Die Extremitäten reagieren hingegen weniger empfindlich auf Temperaturschwankungen.

Das lokale Empfinden wird mit einer Gleichung berechnet, die die lokalen Hauttemperaturen, die mittleren Hauttemperaturen und die Ableitung über die Zeit von Haut- und Kerntemperaturen berücksichtigt. Sie sind vor allem zur Berücksichtigung von transienten Bedingungen, wie sie hier in der Arbeit berechnet werden, notwendig.

Die lokalen Hauttemperaturen  $T_{s,i}$  repräsentieren die Temperaturen der lokalen Körperteile und die mittlere Hauttemperatur  $T_{s,mean}$  repräsentiert die globale Körpertemperatur. Das lokale Empfinden wird durch eine Funktion, die das aktuelle lokale Empfinden und das aktuelle globale Empfinden unter Berücksichtigung der Sollwerte  $(T_{s,i,set})(T_{s,mean,set})$  berechnet. Der Sollwert steht für die Temperatur, bei der der lokale Körperteil sich in einem thermisch neutralen Zustand befindet. In Kapitel 5.1.1 wird auf die Sollwertberechnung eingegangen.

Gemäß folgender Gleichung wird das lokale Empfinden  $S_i$  berechnet [77]:

$$S_i = 4 * \left( \frac{2}{1 + e^{-C1(T_{s,i} - T_{s,i,set}) - K1 * [(T_{s,i} - T_{s,mean}) - (T_{s,i,set} - T_{s,mean,set})]}} - 1 \right) + C2_i \frac{dT_{s,i}}{dt} + C3_i \frac{dT_c}{dt} \quad (4-37)$$

Bei der Berechnung werden vier unterschiedliche Koeffizienten C1, C2, C3, K1 berücksichtigt, die für jedes der Körperteile individuell sind.

Der Koeffizient C1 beschreibt die Hauttemperaturwechselrate, also die Auswirkung von Temperaturänderungen auf das lokale Körpersegment. Beispielsweise bewirken kleine (negative) Änderungen der Hauttemperatur im Brust- und Rückenbereich große Änderungen im lokalen Empfinden (Steile Kurve, C1 bekommt einen großen Wert). Für andere Körperteile wie beispielsweise die Hand, ist die Hauttemperaturwechselrate sehr groß, aber das Empfinden weniger stark und die Kurve daher weniger steil, was sich in einem niedrigeren C1 Wert äußert.

Jeder Körperteil hat einen eigenen K1 Wert, der für abnehmendes oder zunehmendes Temperaturempfinden unterschiedlich ist. Die Koeffizienten sind in der Arbeit von Hui Zhang aufgeführt [77]. Alle 16 Körperteile besitzen einen eigenen C2 Koeffizienten, der für abnehmende oder zunehmende Hauttemperaturen unterschiedlich ist. C3 ist ähnlich dem Koeffizienten C2. Er bezieht sich auf die Änderungen der Kerntemperaturen anstelle der Hauttemperaturen.

#### 4.2.2 Globales Empfinden

Das globale Empfinden wird durch das Zusammenwirken lokaler Empfindungswerte beeinflusst. In Zhang's Modell [79] haben die Körperteile unterschiedliche Gewichtungen für warmes und kühles Empfinden. Während der Modellentwicklung stellte sich heraus, dass drei Körperteile (Rücken, Hüfte, Brustbereich) einen dominanten Einfluss auf das globale Empfinden haben. Der Kopf reagiert dabei sehr empfindlich auf warme Einwirkungen.

Das globale Empfinden tendiert dazu, sich den unangenehmsten empfundenen (kalten oder heißen) lokalen Empfindungen anzunähern. Dies spielt sich nach einem sogenannten „Beschwerde“-Muster nach [79] ab. In neutralen Umgebungsbedingungen folgt der Körper jedoch nicht diesem „Beschwerde“-Muster.

Zur Berechnung des globalen Empfindens erfolgt zunächst eine Einteilung der Körperteile. Im ersten Schritt wird geprüft, ob gegenteilige Empfindungswerte vorliegen (zum Beispiel, ob sich ein Körperteil warm fühlt, während sich der Rest der Körperteile kalt fühlt). In den weiteren Schritten werden die Empfindungswerte in Gruppen eingeteilt, um in einem späteren Schritt das globale Empfinden zu berechnen.

Die Einteilung erfolgt entsprechend dem Empfinden der einzelnen Körperteile („zu heiß“ oder „zu kalt“) und auch bei gegensätzlichen Empfindungswerten einzelner Körperteile gegenüber der Gesamtheit der restlichen Körperteile (beispielsweise ein Körperteil heiß, während der restliche Körper kalt ist).



1. Je weiter sich das lokale Empfinden von einem neutralen Zustand entfernt (Richtung -4 oder +4), umso mehr verändert sich die lokale Behaglichkeit in Richtung eines extrem unbehaglichen Zustands (-4).
2. Das lokale Empfinden bei dem ein Zustand maximaler Behaglichkeit erreicht wird, bewegt sich parallel zu dem globalen Empfinden des Körpers. Je wärmer oder kühler das globale Empfinden ist, desto eher wird ein umgekehrtes lokales Empfinden (kühl oder warm) mit maximaler Behaglichkeit assoziiert.
3. Die Behaglichkeit setzt sich aus dem globalen Empfinden und den lokalen Empfindungswerten zusammen. Je wärmer (oder kühler) das globale Empfinden ist, desto größer ist die Behaglichkeit bei lokalem entgegengesetzten Wärmeempfinden (Kühlen oder Wärmen). Dabei werden die größten Behaglichkeitslevel unter asymmetrischen Bedingungen erreicht (im Vergleich zu neutralen Bedingungen).
4. Maximale Behaglichkeitslevel (+4) treten nur bei asymmetrischen Bedingungen auf.
5. Sehr extreme Empfindungswerte wie -4 (sehr kalt) und +4 (sehr warm) führen zu einer globalen Unbehaglichkeit mit einem Wert von -4.

Für die Details wird auf Zhangs Modell [78] verwiesen, in dem alle Gleichungen und Koeffizienten aufgeführt werden.

#### 4.2.4 Globale Behaglichkeit

Die globale Behaglichkeit kann anhand von zwei Regeln nach Zhang berechnet werden [79]. Die Regeln unterscheiden sich darin, inwieweit die Nutzer\*innen Einfluss auf die unmittelbare thermische Umgebung haben und ob transiente Umgebungsbedingungen vorliegen (Regel 2) oder ob die Umgebungsbedingungen statisch sind und die Nutzer\*innen keinen Einfluss haben (Regel 1).

Bei Regel 1 wird der Durchschnitt aus der Summe der zwei kleinsten lokalen Behaglichkeitswerten berechnet.

Bei Regel 2 wird der Durchschnitt aus der Summe der zwei kleinsten lokalen Behaglichkeitswerten plus dem maximal größten lokalen Behaglichkeitswert berechnet.

## 5 Kopplung von PhySCo mit der Gebäudesimulationssoftware Esp-r

Es ist das Ziel dieser Arbeit, einen virtuellen Gebäuderegler zu entwickeln, der durch eine adaptive Regelung der zentralen Heiz- und Kühlanlage in der Lage ist, ein behagliches Raumklima herzustellen und dabei gleichzeitig den Heiz- und Kühlbedarf der zentralen Anlage zu reduzieren. Dieses Kapitel beschreibt die Grundlagen der Kopplung zwischen dem Programm PhySCo und der Gebäudesimulationssoftware Esp-r [122] welche die obigen Ziele erreichen soll.

### 5.1 PhySCo

Das Physiologie-Modell sowie das „Sensation and Comfort Model“ wurden gekoppelt, um sie direkt in der Gebäudesimulation nutzen zu können. Das gekoppelte Modell **PhySCo** steht für „**Ph**ysiology, **S**sensation and **C**omfort“.

Abbildung 5-1 zeigt die Zusammenhänge und Berechnungen innerhalb PhySCo. Das Physiologie-Modell berechnet mit den Eingabeparametern der Umgebungsbedingungen, den statischen physiologischen Eigenschaften und dem durch die Nutzer\*innen festgelegten Bekleidungsfaktor und unter zusätzlicher Berücksichtigung der Stoffwechselrate (Aktivitätslevel) die 16 Haut- und Kerntemperaturen.

Die Haut- und Kerntemperaturen werden innerhalb des „Sensation and Comfort Models“ genutzt, um lokales Empfinden der 16 Körperteile, globales Empfinden und lokale sowie globale Behaglichkeit zu berechnen.

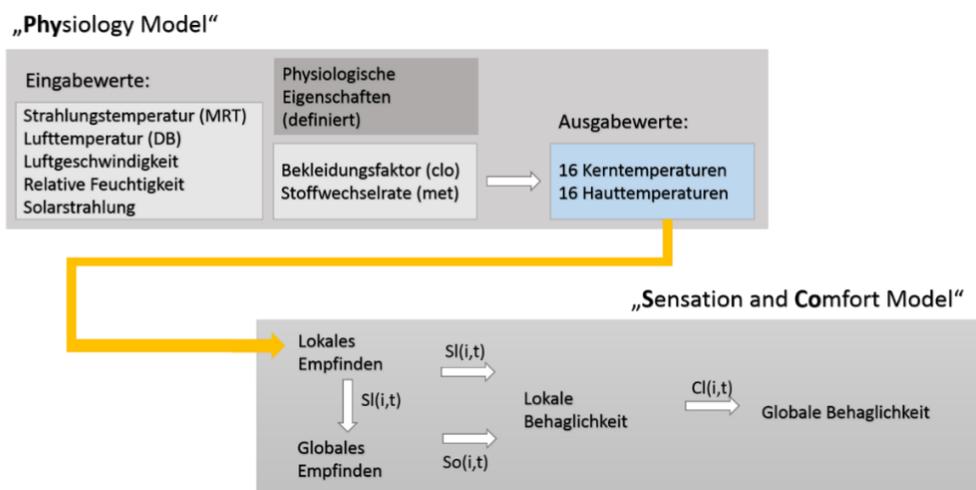


Abbildung 5-1: Berechnung der lokalen Haut- und Kerntemperaturen, lokalem und globalem Empfinden und lokaler und globaler Behaglichkeit

Da sich die Körpertemperaturen mit zunehmendem Aktivitätslevel sowie Bekleidungsfaktor erhöhen und dies einen großen Einfluss auf das thermische Empfinden hat, wurden für das „Sensation and Comfort“ Modell Anpassungen in Form

neu erstellter Sollwerttemperaturen ( $T_{s,i,set}$ ), durchgeführt. Diese werden bei der Berechnung des thermischen Empfindens berücksichtigt (Kapitel 4.2.1).

### 5.1.1 Sollwertberechnung für thermisches Empfinden

Um das thermische Empfinden für verschiedene Kombinationen aus Bekleidung und Aktivitätslevel unter möglichst realen Bedingungen berechnen zu können, benötigt das „Sensation and Comfort Model“ die neutralen Hauttemperatursollwerte ( $T_{s,i,set}$ ). Diese repräsentieren ein thermisch neutrales Gefühl. Ausgehend von diesen neutralen Hauttemperatursollwerten wird das lokale Empfinden der einzelnen Körperteile bestimmt (Kapitel 4.2.1).

Es wurden zwei Schritte durchgeführt, um die neuen Sollwertkombinationen zu berechnen. Zunächst wurden die Umgebungstemperaturen für die jeweilige Kombination aus Bekleidung und Aktivitätslevel ermittelt, die ein neutrales (globales) Empfinden auslösen. Hier diente die Veröffentlichung von Zhao [121] als Orientierung. Die Veröffentlichung basiert ebenfalls auf den Gleichungen des „Sensation and Comfort“ Modells von Zhang [77].

Mithilfe des Physiologie-Modells wurden die neutralen Hauttemperaturen für die jeweilige Kombination aus Bekleidung und Aktivitätslevel als neutrale Sollwerte  $T_{s,i,set}$  für das „Sensation and Comfort“ Modell ermittelt.

Die vier berücksichtigten Bekleidungssets für Winter, Frühling, Sommer und Herbst werden in Anhang A vorgestellt. Die Bekleidungssets setzen sich aus einzelnen clo - Werten für jeden Körperteil zusammen. Werden hier Änderungen durchgeführt, müssen neue Sollwerttemperaturen berechnet werden.

In Tabelle 5-1 werden die neutralen Umgebungstemperaturen, auf denen die Sollwertanpassung (PhySCo) basiert, gezeigt und den Umgebungstemperaturen aus der Veröffentlichung von Zhao [121] gegenübergestellt.

*Tabelle 5-1: Neutrale Umgebungstemperaturen [°C] für die Festlegung der Sollwerte für das lokale Empfinden, im Vergleich Zhao [121] und PhySCo*

Met/clo	Sommer clo 0,6	Sommer clo 0,6	Frühling clo 0,7	Frühling clo 0,7	Winter clo 1,0	Winter clo 1,0
	Zhao	PhySCo	Zhao	PhySCo	Zhao	PhySCo
0,9	26,85	26,7	26,3	26,1	24,70	24,8
1,0	25,5	25,4	24,95	24,73	23,30	23,4
1,1	24,80	24,7	24,2	23,96	22,40	22,5

Die Sollwerte  $T_{s,i,set}$  für die jeweiligen Kombinationen sind in Anhang A aufgeführt.

### 5.1.2 PhySCo in der Anwendung

Nachstehend werden beispielhaft Simulationsergebnisse gezeigt, die mithilfe von PhySCo berechnet wurden. Die Ausgabewerte wie lokale Hauttemperaturen, Werte des

lokalen und des globalen Empfindens sowie Werte der lokalen und der globalen Behaglichkeit werden für ausgewählte Körperteile aufgeführt.

Tabelle 5-2 zeigt die Parameter der vier Phasen der Simulation. Sie gliedern sich in eine obligatorische Aufwärm- sowie in drei Hauptphasen. Diese drei Phasen unterscheiden sich durch den Wechsel der Raumlufttemperatur und der mittleren Strahlungstemperatur, wobei die übrigen Parameter unverändert bleiben.

Tabelle 5-2: Simulationsparameter der vier Phasen bestehend aus einer Aufwärm- und drei regulären Phasen

Phase	Aufwärmen	1	2	3
Raumlufttemperatur [°C]	22	24	18	30
Mittlere Strahlungstemperatur [°C]	22	24	18	30
Luftgeschwindigkeit [m/s]	0,1	0,1	0,1	0,1
Relative Luftfeuchtigkeit [%]	50	50	50	50
Bekleidungsset für Winter [clo]	1,0	1,0	1,0	1,0
Metabolische Rate in [W/m <sup>2</sup> ]	70	70	70	70
Einfluss durch Solarstrahlung	-	-	-	-
Zeitspanne [min]	90	480	480	480

Folgende Abbildung 5-2 zeigt die Hauttemperaturen  $T_s$  ausgewählter Körperteile von Kopf, Rücken, der linken Hand und dem linken Bein während der Simulation.

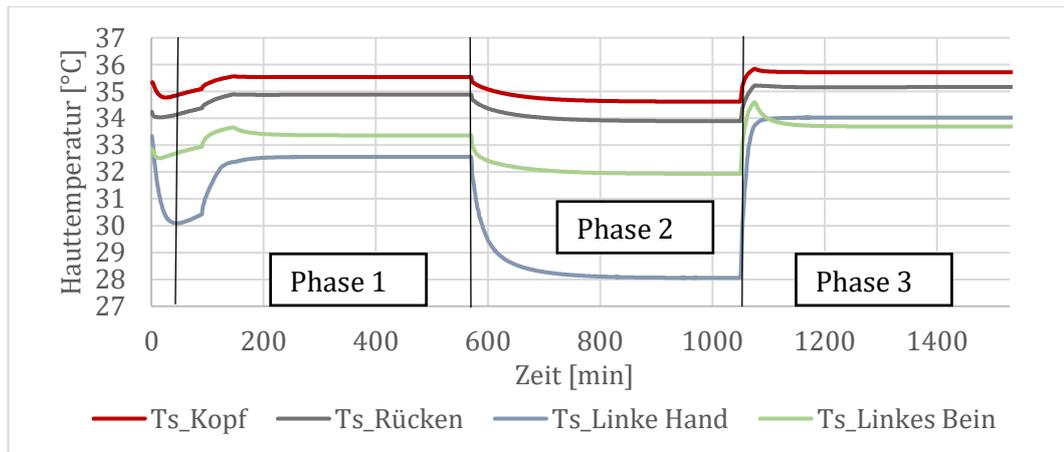


Abbildung 5-2: Hauttemperaturen  $T_s$  ausgewählter Körperteile während der Simulation

Nach den 90 Minuten Aufwärmphase des Modells stellt sich bei Phase 1, bei einer Raum- und mittleren Strahlungstemperatur von 24 °C (siehe Tabelle 5-2) eine stabile Hauttemperatur für alle Körperteile ein. Der Kopf zeigt mit 35,5 °C die höchste Temperatur, während die linke Hand mit 32,5 °C die niedrigste Temperatur aufweist. Der Temperaturwechsel in Phase 2 auf 18 °C wirkt sich am stärksten auf die linke Hand aus. Die Hauttemperatur der linken Hand sinkt auf 28 °C ab. Auch der Temperaturwechsel in Phase 3 auf 30 °C hat wiederum die größte Auswirkung auf die linke Hand. Die Hauttemperatur der linken Hand steigt hier auf 34 °C und übersteigt damit die Hauttemperatur des linken Beins (33,7 °C).

Der Kopf und auch der Rücken zeigen zwar Temperaturänderungen auf. Diese fallen jedoch im Vergleich zu den peripheren Körperteilen wesentlich kleiner aus. Das kann damit erklärt werden, dass alle lebensnotwendigen Organe innerhalb des Kopfes sowie im Brust- und Rückenbereich liegen. Hier werden die Temperaturen durch Regulationsmechanismen konstant gehalten, da selbst kleinere Temperaturschwankungen unmittelbare Auswirkungen auf lebensnotwendige Funktionen haben.

Basierend auf den lokalen Hauttemperaturen (Abbildung 5-2) werden mit dem „Sensation and Comfort“ Modell die lokalen Werte des Empfindens berechnet. Abbildung 5-3 zeigt die resultierenden lokalen Empfindungswerte von Kopf, Rücken, der linken Hand und dem linken Bein. Die Skala des lokalen Empfindens wurde auf den Bereich von -3 bis +3 reduziert (Abbildung 5-3).

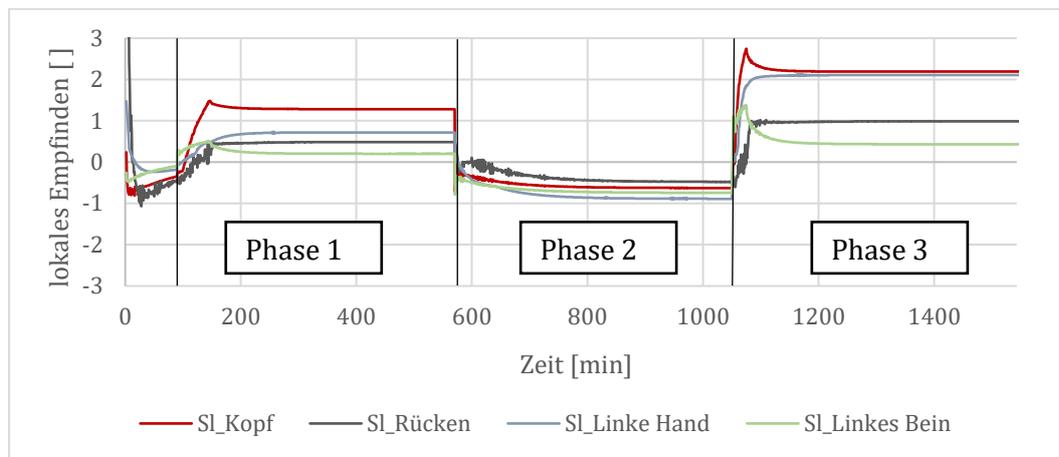


Abbildung 5-3: Lokales Empfinden  $S_i$  ausgewählter Körpersegmente während der Simulation.

Das Diagramm zeigt, dass sich der Wechsel der Hauttemperaturen unterschiedlich auf das lokale Empfinden der verschiedenen Körperteile auswirkt. Der Kopf zeigt in Phase 1, bei einer mittleren Strahlungs- und Raumtemperatur von 24 °C mit einem Wert von +1,3 ein warmes Empfinden. Ändert sich in Phase 2 die mittlere Strahlungs- und Raumtemperatur auf 18 °C, zeigt sich für den Kopf ein Empfindungswert von -0,5, also eher leicht kühl. Während die Hauttemperaturen der einzelnen Körperteile große Unterschiede zeigen (Abbildung 5-2) liegen die Empfindungswerte in der zweiten Phase bei 18 °C relativ nah beieinander (Abbildung 5-3).

Steigt in Phase 3 die mittlere Strahlungs- und Raumtemperatur auf 30 °C, zeigen der Kopf und die linke Hand mit einem Wert von +2,0 die höchsten Empfindungswerte. Der Empfindungswert des Rückens liegt mit +1 deutlich unter diesen Werten. Das gilt auch für das linke Bein, das mit 0,4 einen noch geringeren Empfindungswert zeigt. Kopf und linke Hand werden als warm empfunden, der Rücken als leicht warm. Der Empfindungswert des linken Beins liegt zwischen neutral und leicht warm.

Nachfolgendes Diagramm (Abbildung 5-4) zeigt die Werte für das globale Empfinden. Das globale Empfinden wird aus den Hauttemperaturen und den lokalen Werten des Empfindens berechnet.

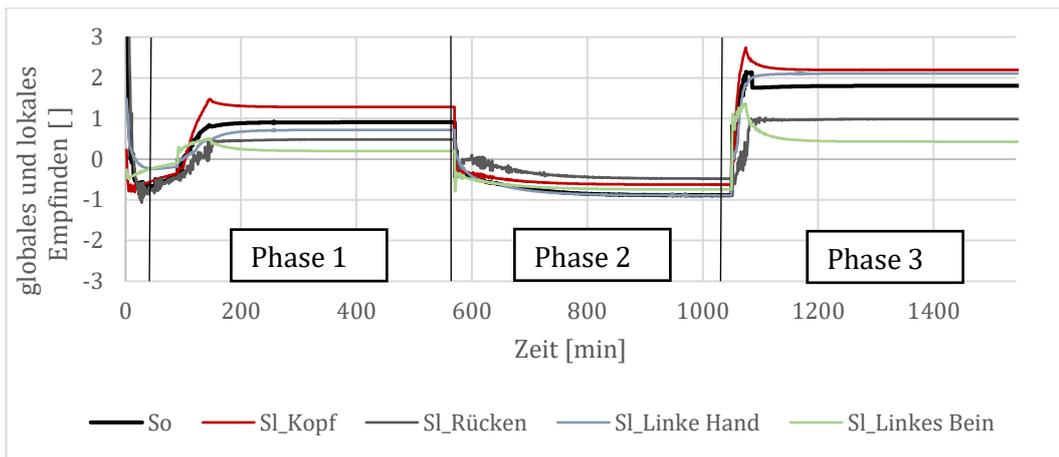


Abbildung 5-4: Globales Empfinden  $S_o$  (schwarz) während der Simulation als Resultat der lokalen Empfindungswerte  $S_i$

Der globale Empfindungswert ( $S_o$ ) liegt in Phase 1 mit einem Wert von +1 im Bereich des leicht warmen Empfindens. In Phase 2, mit einer Strahlungs- und Raumtemperatur von (18 °C) sinken die lokalen Empfindungswerte und auch das globale Empfinden bis auf einen Wert von -1, also in einen leicht kühlen Bereich. In Phase 3, mit einer Strahlungs- und Raumtemperatur von 30 °C liegt das globale Empfinden mit einem Wert von +2 im deutlich warmen Bereich. Dieser Anstieg wird durch das lokale Empfinden des Kopfs stark beeinflusst.

Die lokale Behaglichkeit (Abbildung 5-5) berechnet sich aus dem lokalen Empfinden (Abbildung 5-3) und dem globalen Empfinden (Abbildung 5-4). In Abbildung 5-5 werden die lokale Behaglichkeit  $C_i$  und das globale Empfinden  $S_o$  gezeigt. Positive Behaglichkeitswerte auf der y-Achse werden als behaglich empfunden, negative Werte als unbehaglich. Hier zeigt sich die unterschiedliche Sensibilität der Körperteile. Der Kopf fühlt sich mit einem Wert von -0,2 bei einer Strahlungs- und Raumtemperatur von 24 °C eher unbehaglich. Beim Absenken der Strahlungs- und Raumtemperatur auf 18 °C in Phase 2 liegen die Behaglichkeitswerte von Kopf und Rücken mit einem Wert von +2,0 im behaglichen Bereich.

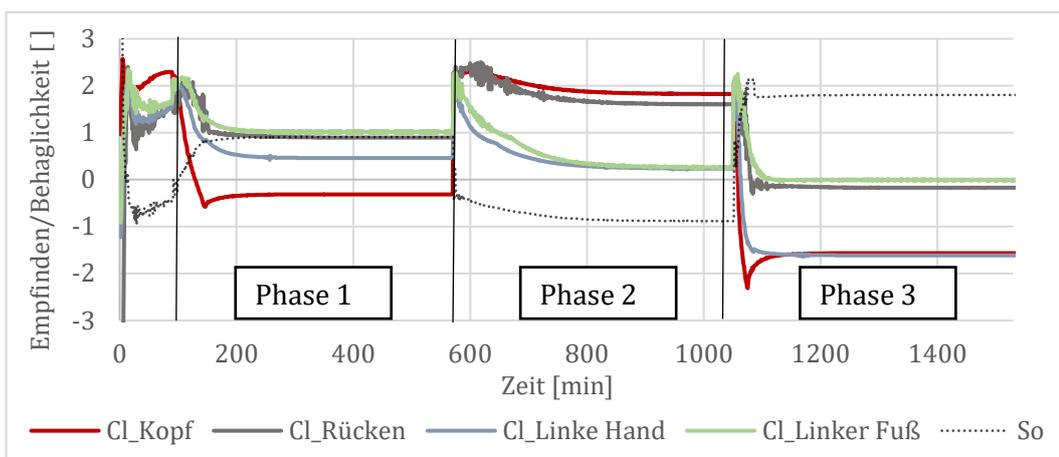


Abbildung 5-5: Lokale Behaglichkeit  $C_i$  von Kopf, Rücken, linker Hand und linkem Fuß und dem globalen Empfinden  $S_o$  während der Simulation mit den unterschiedlichen Phasen

Bei einem Anstieg der mittleren Strahlungs- und Raumtemperatur auf 30 °C sinken die Werte deutlich in den negativen Behaglichkeitsbereich mit einem Wert von -1,8. Die linke Hand und der linke Fuß liegen in Phase 2 und Phase 3 eher im neutralen Bereich und zeigen keine wesentlichen Änderungen bei einem Temperaturwechsel. Diese Simulationen wurden mit Winterbekleidung von 1,0 clo durchgeführt. Der Kopf und die Hand reagieren am sensibelsten auf Temperaturschwankungen, wobei eine untere Temperatur von 18 °C für den Kopf am angenehmsten empfunden wird.

Die globale Behaglichkeit (Abbildung 5-6) wird auf der Basis der Werte der lokalen Behaglichkeit (Abbildung 5-5) der einzelnen Körperteile unter Anwendung der Regeln zur Ermittlung der globalen Behaglichkeit errechnet (siehe Kapitel 4.2.4).

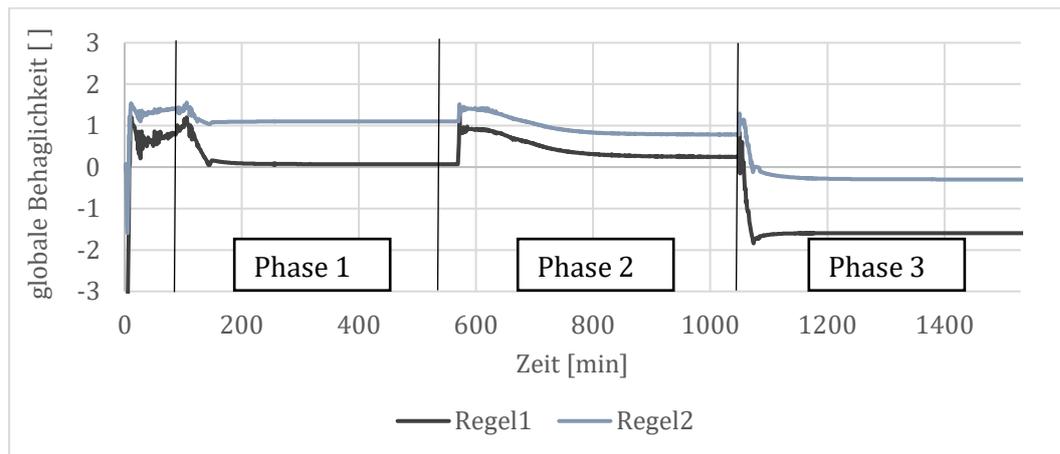


Abbildung 5-6: globale Behaglichkeit, Berechnung mittels Regel 1 und Regel 2

Die Behaglichkeitswerte nach Anwendung von Regel 1 zeigen geringere Werte gegenüber denen, die mit Regel 2 berechnet wurden (siehe Kapitel 4.2.4). Nach Regel 1 fühlt sich der Mensch vor allem in den warmen Umgebungsbedingungen der Phase 3 (Strahlungs- und Raumtemperatur 30 °C) mit einem Wert von -1,8 unbehaglich. Die Behaglichkeitswerte nach Regel 2 liegen ebenfalls im negativen Bereich, aber deutlich in der Nähe eines neutralen Wertes mit einem Behaglichkeitswert von -0,3.

Für die Anwendung im Alltag bedeutet das, dass Regel 2 (siehe Kapitel 4.2.4) dort angewendet werden soll, wo der Mensch Eingriffsmöglichkeiten zur Steuerung der Umgebungstemperaturen hat (beispielsweise durch Öffnen der Fenster, Wechseln der Bekleidung, Einfluss auf Verschattungssysteme), um ein gleichmäßiges Behaglichkeitslevel zu halten. Bei Anwendung von Regel 1 sind diese Eingriffsmöglichkeiten nicht gegeben. Es handelt sich also um ein starres System, das zu einer geringeren Behaglichkeit beim Menschen führt.

## 5.2 Die Gebäudesimulationssoftware Esp-r

Für die Kopplung mit PhySCo wurde die Gebäudesimulationssoftware Esp-r ausgewählt. Esp-r (Environmental Systems Performance - research) [123] ist ein Programm, das an der Strathclyde-Universität Glasgow entwickelt wurde und laufend von Wissenschaftler\*innen weiterentwickelt wird. Esp-r ist in den Programmiersprachen

Fortran 77 und C programmiert und erlaubt den Anwendenden die Weiterentwicklung oder Änderung des Quellcodes. So kann das Programm an spezifische Problemstellungen durch die Anwendenden angepasst werden.

Esp-r ermöglicht die Berechnung transienter Innenraumbedingungen über Jahressimulationen oder einen anderen definierten Zeitraum unter Anwendung der Klimadaten verschiedener Orte. Es können, je nach geforderter Detailgenauigkeit, Simulationsschritte von einer Stunde bis zu wenigen Minuten ausgewählt werden. Für die Simulation von Anlagensystemen werden kleinere Zeitschritte von einer Sekunde bis zu maximal einer Stunde empfohlen.

Nach der Modellierung von Energie- und Fluidströmungen im Gebäudemodell und dessen Anlagen kann im Planungsprozess die Detailgenauigkeit der Modellierung durch spezifische Informationen über das Anlagensystem und die geplante Steuerung angepasst und optimiert werden. Durch diese Planung können Lösungsansätze zur Optimierung von Strömungsnetzwerken, Anlagensysteme, Raumluftqualität und Beleuchtung ermittelt werden. Die Ergebnisse können dann je nach Fragestellung, zum Beispiel nach Innenraumklima, Oberflächentemperatur, Temperatur verschiedener Bauteilschichten, relativer Feuchtigkeit, Energieeintrag etc. gefiltert werden.

Dem zu untersuchenden Gebäude werden Knoten für jede Bauteilschicht, Zwischenräume, Luftknoten etc. zugeordnet. Zwischen einem Knoten und seinem Nachbarknoten findet eine thermische Interaktion statt, die sich in der Wärmebilanz abbilden lässt. Die Gesamtheit aller so berechneten Wärmebilanzen wird in einem Gleichungsset über Zeit und Raum abgebildet. Für jeden beliebigen Simulations-Zeitschritt werden die aktuellen Werte ermittelt. Diese Werte fließen in den nachfolgenden Simulations-Zeitschritt ein [88, 124].

Abbildung 5-7 zeigt Knoten einer Zwei-Zonen-Konstruktion sowie die verschiedenen Umgebungseinflüsse.

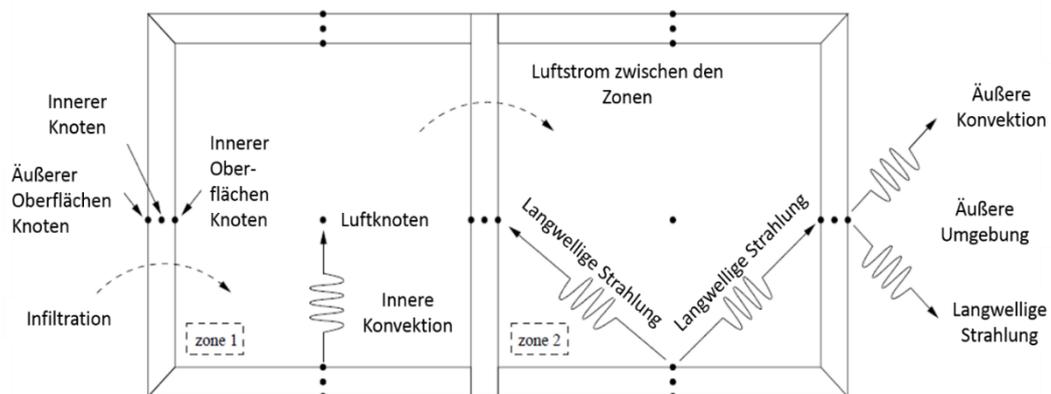


Abbildung 5-7: Finite-Differenz Diskretisierung und innere Knoten-Wärmeströme, nach [125]

Jeder homogenen Schicht werden drei Knoten zugeordnet, je ein Knoten für die innere und äußere Oberfläche und ein dritter mittiger Knoten [124].



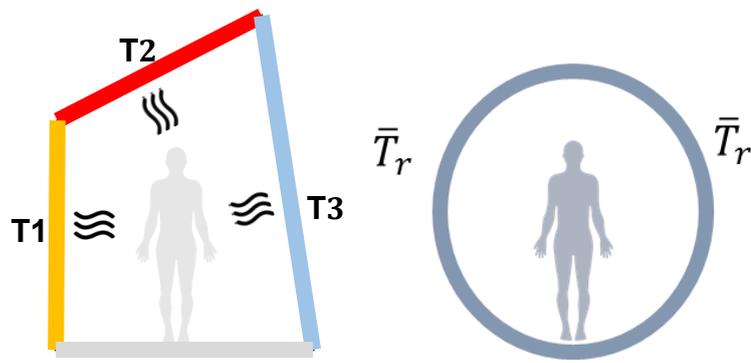


Abbildung 5-9: Definition der mittleren Strahlungstemperatur auf den menschlichen Körper, aus [127]

Innerhalb der Kopplung (Kapitel 5.3) werden 16 lokale MRT-Werte  $\bar{T}_r$  für die einzelnen Körpersegmente (PhySCo) sowohl mit den jeweiligen Sichtfaktoren<sup>1</sup>  $F_{p-1}$  zwischen dem Manikin und einer Oberfläche N als auch den Oberflächentemperaturen  $T_N$  der umgebenden Oberflächen nach der Gleichung (5-1) berechnet [127].

$$\bar{T}_r = T_1^4 F_{p-1} + T_2^4 F_{p-2} + \dots + T_N^4 F_{p-N} \quad (5-1)$$

Die lokalen MRT-Werte der einzelnen Körperteile verändern sich in Abhängigkeit zur Oberflächentemperatur sowie der Körperhaltung und -form eines Menschen, wobei die zwei letzteren Faktoren in den Sichtfaktor einfließen. Daher ist zur Bestimmung der lokalen MRT-Werte die Sichtfaktorberechnung  $F_{p-N}$  von elementarer Bedeutung. Die Berechnung des Sichtfaktors  $F_{p-N}$  in Esp-r erfolgt durch die „Raytracing“ Methode [129]. Die „Raytracing“ Methode, auch als Strahlungsverfolgung bezeichnet, berechnet die Sichtfaktoren zwischen MRT-Sensoren und den umgebenden Oberflächen. Sie wird von Semlitsch [130] als Berechnungsansatz vorgestellt. Die Spur eines Teilchens oder einer Welle formt einen Strahl. Bei der Strahlungsverfolgung wird ein Bündel von Strahlen in den Raum gesendet und verfolgt. Mithilfe eines Algorithmus werden dabei dreidimensionale Objekte im Raum erkannt und verdeckte Oberflächen bestimmt.

## 5.2.2 Raumlufthtemperatur

In Esp-r wird über die Energiebilanz eines Knotens (I) innerhalb eines Raumes die Raumlufthtemperatur (engl. „Dry Bulb Temperature“ - DB) berechnet (Abbildung 5-10).

Der Wärmetransport zwischen der Luft in der Zone und den inneren Oberflächen findet über Konvektion statt. Abbildung 5-10 zeigt im Zentrum den Luftknoten „I“ einer Zone, welcher von den Knoten S1 bis S4 der jeweiligen Oberflächen umgeben ist. „J“ repräsentiert den Luftknoten einer benachbarten Zone und „o“ die Außenluft.

---

<sup>1</sup> Der Sichtfaktor ist der Anteil der Energie, der aus einer isothermen und diffusen Oberfläche durch Emission austritt und der direkt von einer anderen Oberfläche aufgenommen wird. Sichtfaktorenberechnungen sind oft rechenintensiv. Die Rechenzeit kann mit der Anzahl der beteiligten Flächen exponentiell ansteigen [128]

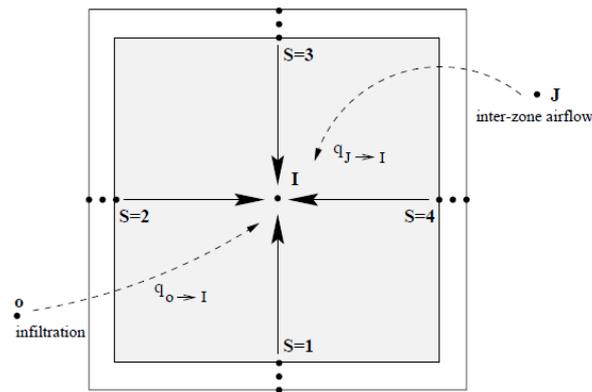


Abbildung 5-10: Wärmebilanz am Luftknoten („I“) aus [125]

Die Wärmebilanzgleichung für den Luftknoten „I“ berücksichtigt den zonenübergreifenden Luftstrom, Infiltration der Außenluft in die Zone und die Konvektion durch Wärmequellen innerhalb der Zone (Gleichung 5-2) [88].

$$\begin{aligned}
 & (\text{Wärmespeicherung in Zone}) \\
 & = (\text{netto Konvektion in Zone}) \\
 & + (\text{zonenübergreifender Luftstrom}) \\
 & + (\text{Infiltration der Außenluft in die Zone}) \\
 & + (\text{Konvektion durch Wärmequelle innerhalb der Zone})
 \end{aligned}
 \tag{5-2}$$

Die Raumlufttemperatur wird nur einmal am Zonenluftknoten ermittelt, sodass bei der Kopplung mit PhySCo (Kapitel 5.3) nur ein einziger definierter Wert für die Raumlufttemperatur (DB) an alle 16 Körperteile weitergegeben wird.

### 5.2.3 Luftfeuchtigkeit

Die Luftfeuchtigkeit wird in jedem Zeitschritt neu berechnet und an PhySCo gesendet. Es wird ein Wert für alle 16 Körperteile berechnet. Die Berechnung ist von den beeinflussenden Faktoren wie der gewählten Wetterdatei der möglichen Kontrolle durch die Gebäuderegler und den internen Lasten innerhalb des Gebäudes (Wasserflächen, Evaporator usw.) abhängig.

### 5.2.4 Luftgeschwindigkeit

In Esp-r kann ein Lüftungsnetzwerk modelliert werden. Bei einem Lüftungsnetzwerk findet ein definierter Luftaustausch pro Stunde mit der Außenluft statt. Die Luftgeschwindigkeit kann hier jedoch nur an den (Fenster-)Öffnungen berücksichtigt werden. Um die Luftgeschwindigkeit zu ermitteln, muss ein CFD-Modul (engl. „Computational Fluid Dynamics“) genutzt werden. Mit der CFD-Berechnung können die Luftgeschwindigkeit und die Ausbreitung verschiedener Luftströme berechnet werden.

Innerhalb der Kopplung wird für den Standardfall eine konstante Luftgeschwindigkeit von 0,1 m/s pro Körperteil angenommen, da eine CFD-Analyse die Rechenleistung erheblich vergrößern würde und somit eine Jahressimulation erschweren würde. Alternativ kann die Luftgeschwindigkeit pro Körperteil auch innerhalb eines Zeitplans definiert werden.

### 5.2.5 Solarstrahlung

Die Solarstrahlung wird in dieser Arbeit lediglich im Zusammenhang mit der wirkenden Raumtemperatur und der mittleren Strahlungstemperatur berücksichtigt. Esp-r kann die einwirkende Sonnenstrahlung energetisch flächendeckend über die Oberflächenenergiebilanz berücksichtigen.

PhySCo ist in der Lage, mit dem Ansatz (SoLoCalc) von Hoffmann et al. [100], die direkte Solarstrahlung zu berücksichtigen. Dieser Ansatz wurde in der Kopplung noch nicht weiter berücksichtigt.

## 5.3 Kopplung der beiden Programme

### 5.3.1 Datenaustausch zwischen PhySCo und Esp-r

Die Grundlage der Kopplung wurde 2016 von Boudier et al. [131] vorgestellt und innerhalb dieser Arbeit weiterentwickelt.

Zur Berechnung der 16 Haut- und Kerntemperaturen benötigt das Physiologie-Modell (Kapitel 4.1) die Messwerte der folgenden Umgebungsbedingungen: Strahlungstemperatur, Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Luftgeschwindigkeit und Solarstrahlung (Abbildung 5-11).

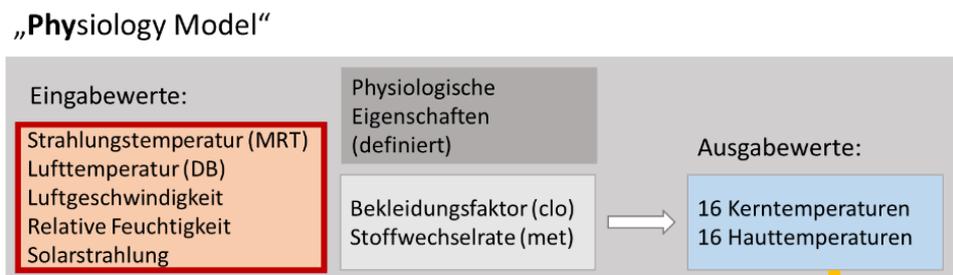


Abbildung 5-11: Ein- und Ausgabewerte des Physiologie-Modells („Physiology Model“) innerhalb von PhySCo

Die Strahlungstemperatur, Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit werden mithilfe von Esp-r für jeden Zeitschritt ermittelt und direkt an das Physiologie-Modell gesendet. Die Luftgeschwindigkeit wird als konstanter Wert von 0,1 m/s pro Körperteil angesetzt. Die Solarstrahlung wird in diesem Projekt lediglich im Zusammenhang mit der Raumtemperatur und der mittleren Strahlungstemperatur berücksichtigt.

Während für die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit ein Wert für alle Körperteile angesetzt wird, werden für die mittlere Strahlungstemperatur (MRT) 16

einzelne Werte für jeden Körperteil berücksichtigt. Die detaillierte Berechnung dieser Werte wird im folgenden Kapitel 5.3.2 vorgestellt.

Die berechneten Haut- und Kerntemperaturen aus dem Physiologie-Modell sowie die Werte zum thermischen Empfinden und der thermischen Behaglichkeit aus dem „Sensation and Comfort Model“ werden in die Gebäudesimulationssoftware eingelesen (Abbildung 5-12). Mit den Letzteren kommt es zu einer adaptiven Anpassung der Heiz- und Kühllswerte des adaptiven Gebäudereglers. Die Sollwertanpassung des adaptiven Gebäudereglers hat einen direkten Einfluss auf die Innenraumbedingungen und somit auf die Eingabewerte des Physiologie-Modells im nächsten Zeitschritt.

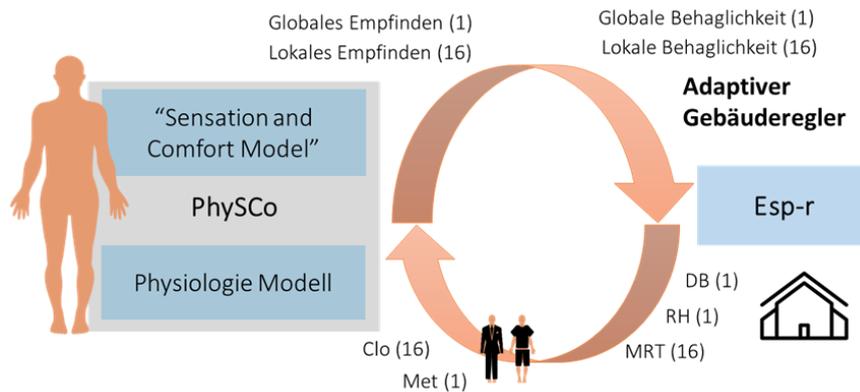


Abbildung 5-12: Datenaustausch während der Kopplung von Esp-r mit PhySCo,

Das Physiologie-Modell berechnet mit diesen neuen Umgebungsbedingungen die thermischen Reaktionen des Körpers und die 16 Haut- und Kerntemperaturen. Diese Werte werden an das „Sensation and Comfort“ Modell weitergereicht. Das Modell berechnet noch einmal das lokale (16 Werte) und das globale Empfinden sowie die lokale (16 Werte) und die globale Behaglichkeit (Abbildung 5-13).

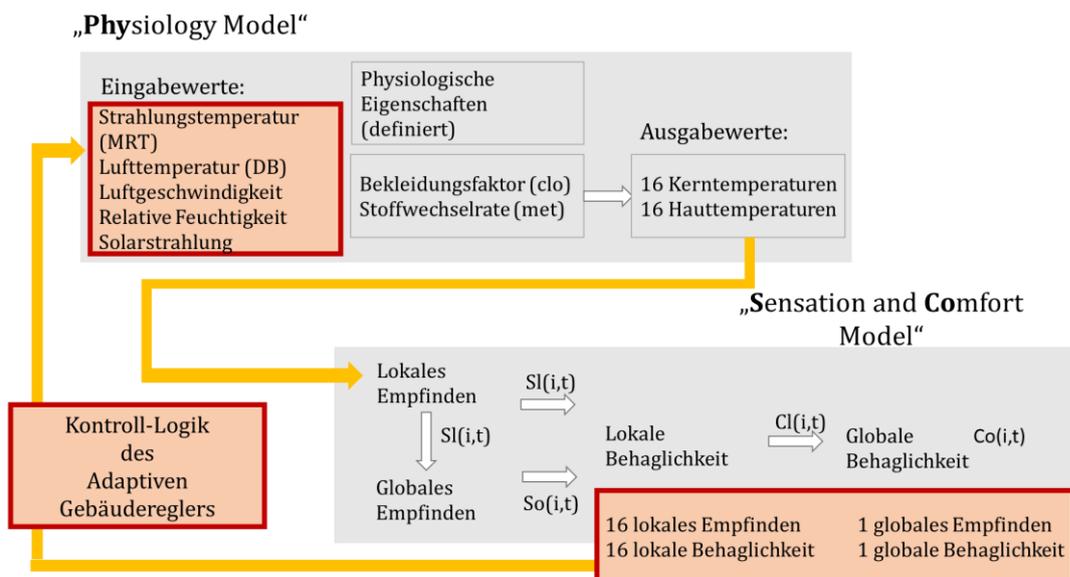


Abbildung 5-13: Kopplung mit PhySCo und der Regelungslogik des adaptiven Gebäudereglers (BCL34)

Mit den Werten zum globalen Empfinden  $S_o$  und der globalen Behaglichkeit  $C_o$  wird innerhalb der Kontroll-Logik des adaptiven Gebäuderegler in Esp-r eine Entscheidung zur Sollwertanpassung der zentralen Heiz- und Kühlanlage getroffen und im nächsten Zeitschritt die Heiz- und Kühlkapazität entsprechend angepasst (Abbildung 5-13).

### 5.3.2 Detaillierte MRT-Berechnung für die 16 lokalen Körperteile

Zur Berechnung detaillierter lokaler Behaglichkeitswerte muss PhySCo alle 16 Körperteile berücksichtigen und neben der Innenraumtemperatur (1 Wert) auch möglichst exakte Werte zur mittleren Strahlungstemperatur (16 Werte) erhalten. Wie bereits in Kapitel 4 beschrieben, reagieren die Körperteile unterschiedlich auf die gleichen thermischen Einwirkungen. Somit kommt den Werten der mittleren Strahlungstemperatur eine große Rolle bei der Ermittlung der (lokalen) thermischen Behaglichkeit zu.

Aus diesem Grund war die Implementierung einer detaillierten MRT-Berechnung ein wichtiger Entwicklungsschritt bei der Kopplung von PhySCo mit Esp-r. Durch die in diesem Kapitel beschriebene detaillierte Methode kann PhySCo unterschiedliche MRT Werte für die 16 Körperteile berechnen.

Die meisten Gebäudesimulationsprogramme arbeiten nicht mit Modellen eines Menschen oder Manikins, da dies die Rechenzeit erheblich verlängern würde. Um den Einfluss der langen Rechenzeit zu umgehen, wird in dieser Arbeit die Methode „(Wo)Man in Cube“ [127] gewählt.

Um die Bedeutung dieses Ansatzes zu verdeutlichen, wird zunächst auf den folgenden Seiten das Modell eines vereinfachten Manikins erklärt und dann im weiteren Verlauf die „(Wo)Man in Cube“ Methode erläutert.

#### Manikin mit 16 quaderförmigen MRT Sensoren

Die erste Modellierung eines Menschenmodells in der Kopplung stützte sich auf einem Manikin, welches aus 16 quaderförmigen MRT-Sensoren besteht, da in Esp-r nur quaderförmige MRT-Sensoren erstellt werden können (Abbildung 5-14).

Das aus Quadern zusammengesetzte Manikin war wegen der unterschiedlichen Größe der zu messenden Oberfläche für eine detaillierte MRT Berechnung für die 16 Körperteile zu ungenau. Ein weiterer negativer Aspekt war die Nichtbeachtung der MRT-Sensoren untereinander, sodass die Ergebnisse verfälscht wurden [127].

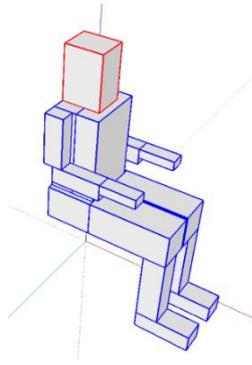


Abbildung 5-14: MRT-Manikin aus 16 quaderförmigen MRT-Sensoren

Ein erster Ansatz zur Lösung dieses Problems war die Nutzung von „PSS“-Werten (Position\_Specific\_Sensor\_Point). Diese gaben den prozentualen Anteil eines für andere Oberflächen sichtbaren Teils an. Beispielsweise liegt die Unterseite des Kopfes auf dem Rumpfquader auf, sodass sie keine Strahlung durch andere Oberflächen erhalten kann. Diese Oberfläche wird mit einem PSS-Wert von null gekennzeichnet. Die Oberseite des Kopfes ist jedoch voll exponiert und erhält einen PSS Wert von eins. Trotz der Anwendung von PSS-Werten lieferte dieser Lösungsansatz nur geringfügige Verbesserungen gegenüber dem Ansatz ohne PSS-Werte [127].

#### „Detaillierte MRT-Berechnung mit „(Wo)Man in Cube“

Zur Lösung der zuvor genannten Probleme wurde ein „(Wo)Man in Cube“ Modell implementiert [127]. „(Wo)Man in Cube“ setzt sich aus drei MRT-Sensor-Boxen zusammen, die ein detailliertes Manikin enthalten. Weiterhin werden dabei zwei Methoden zur Sichtfaktorenberechnung genutzt [127].

Die drei MRT-Sensor-Boxen dienen als eine gemeinsame Hülle für ein detailliertes Manikin (Abbildung 5-15). Die Nutzer\*innen des Simulationsprogramms können zwischen einem sitzenden oder einem stehenden Manikin auswählen.

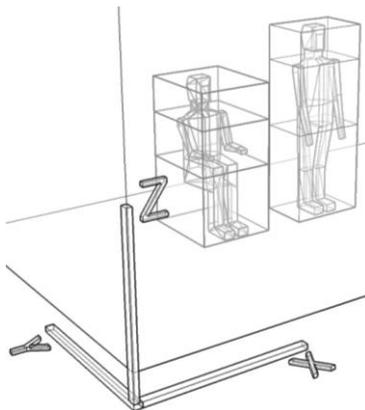


Abbildung 5-15: „(Wo)Man in Cube“ sitzend und stehend

Das Konstrukt der drei MRT-Sensor-Boxen wird in das jeweilige Esp-r Modell eingefügt und kann frei beweglich im Raum platziert und rotiert werden. „(Wo)Man in Cube“ dient im Kopplungsprozess als Modell zur Weiterleitung von lokalen MRT-Werten für die 16 Körpersegmente von PhySCo.

### Detailiertes Manikin

Ein detailliertes Manikin innerhalb der MRT-Sensor-Boxen umgeht die Ungenauigkeiten des kubischen Manikins. Das Manikin stammt aus dem quelloffenen Programm Ladybug [132].

Die spezifischen Dimensionen entsprechen den menschlichen Körperteilen und stimmen sehr gut mit denen des genutzten Manikins innerhalb PhySCo überein. Für den Hüftbereich liegt zum Beispiel ein maximaler Unterschied von  $0,06 \text{ m}^2$  vor. Insgesamt beträgt die maximale Abweichung nur  $0,002 \text{ m}^2$  der maximalen Gesamtoberfläche. Die maximale Körperoberfläche entspricht der durchschnittlichen Körperoberfläche nach DuBois [36] von  $1,87 \text{ m}^2$  und deckt sich sehr gut mit PhySCo (siehe Abbildung 5-16).

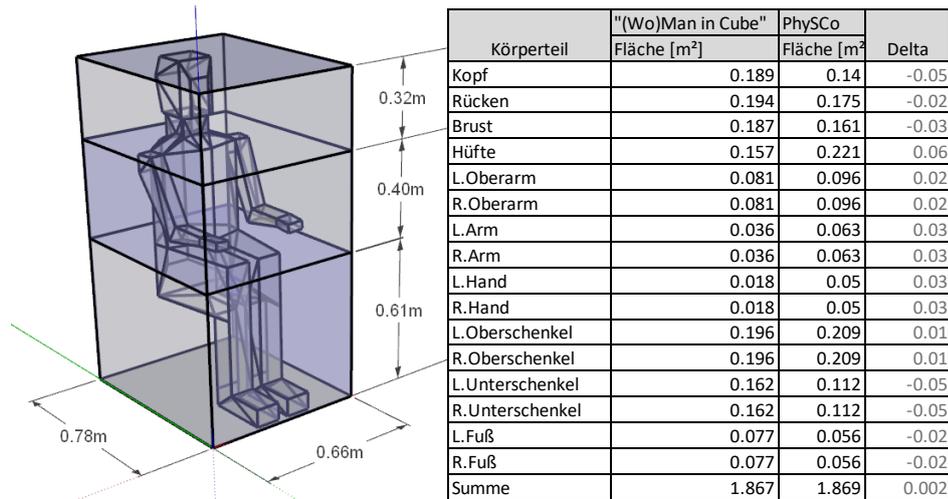


Abbildung 5-16: Manikin in „(Wo)Man in Cube“ und Vergleich der Körperoberflächen des Manikins von „(Wo)Man in Cube“ und PhySCo

### Methode der detaillierten MRT-Berechnung mit „(Wo)Man in Cube“

Zur Berechnung der Sichtfaktoren zwischen den drei MRT-Sensor-Boxen und der Gebäude- oder Zonenhülle wird die Methode der Strahlungsverfolgung in Esp-r verwendet und die Sichtfaktorendatei Vf1 erstellt (siehe Abbildung 5-18).

Die Sichtfaktoren zwischen dem Manikin und den drei Boxen werden mit der Semi-Analytischen Methode und dem quelloffenen Programm View3D berechnet [133]. Die errechneten Sichtfaktoren werden als Datenbank in Esp-r importiert.

Bei der Semi-Analytischen Methode werden die 3D-Geometrien des Gebäudes und des Manikins in Form von einfachen Dreiecken oder planaren Polygonen für einen adaptiven Integrationsalgorithmus zur Berechnung von Sichtfaktoren beschrieben [133]. Die adaptive Integrationsmethode hat sowohl Vorteile in der Genauigkeit als auch in der Rechengeschwindigkeit [128] und ist sehr gut geeignet, die lokalen MRT-Werte der Körperteile zu berechnen.

Die Berechnung der Sichtfaktoren innerhalb des Programms View3D erfolgt zunächst über die adaptive Methode, bei der die Oberflächen in sich verkleinernde Einheiten unterteilt werden. Hierbei gilt, dass eine zu detaillierte Unterteilung die Anforderungen

an die Rechenleistung erhöht, während eine zu niedrige Unterteilung zu Ungenauigkeiten bei der Berechnung der Sichtfaktoren führt.

Die adaptive Berechnungsmethode nutzt eine Gleichung, bei der eine Kantenteilung erfolgt [k=1]. Danach werden die Sichtfaktoren mit der zunehmenden Anzahl von Teilungen  $AF^{[k+1]}$  berechnet, bis die Differenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Werten kleiner als die vorgegebene Toleranz  $\varepsilon$  ist.  $A_{min}$  beschreibt die Minimalfläche unter der vorgegebenen Toleranz (Gleichung 5-3).

$$|AF^{[k+1]} - AF^{[k]}| < \varepsilon A_{min} \quad (5-3)$$

Bei verdeckten Körpern erfolgt eine zusätzliche Berechnung, bei der die Flächen feinmaschiger unterteilt werden (siehe Abbildung 5-17).

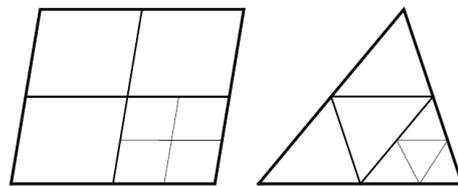


Abbildung 5-17: Ansatz der „Adaptiven Division von Polygonen“ aus [128]

Mit dieser Methode können die Sichtfaktoren innerhalb des Programms View3D detailliert berechnet werden und als Datenbank in Espr importiert werden. Dieser Datensatz (Vf2) der Sichtfaktoren bleibt bei beliebiger Anordnung (sitzend, stehend und gleicher Abstand zwischen Box und Manikin) konstant, sodass das Manikin innerhalb der drei Boxen variabel im Raum verschoben werden kann (siehe Abbildung 5-18).

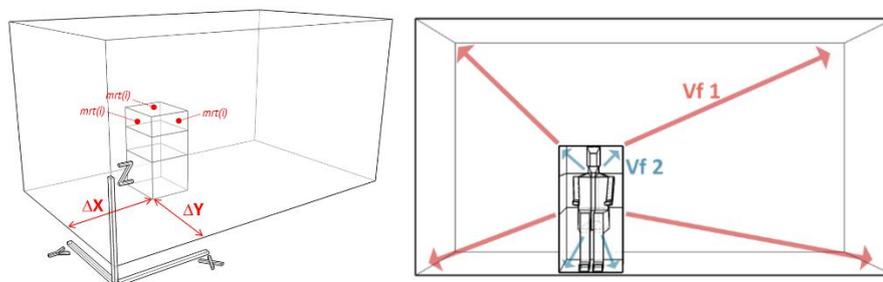


Abbildung 5-18: Links: drei MRT-Sensor-Boxen in der Esp-r Zone, Rechts: Berechnung der Sichtfaktoren Vf1 zwischen den MRT-Sensor-Boxen und der Zone, Vf2 ein konstanter Datensatz von Sichtfaktoren zwischen Manikin und den MRT-Sensor-Boxen [127]

Esp-r berechnet mit den einzelnen „Oberflächentemperaturen“ der MRT-Boxen und der Sichtfaktorendatei Vf2 einen MRT-Wert pro Körperteil. Dieser Wert wird innerhalb der Esp-r Simulation an das Physiologie-Modell weitergereicht [127].

Durch die Nutzung beider Berechnungsmethoden (Strahlungsverfolgung und Semi-Analytische Methode) wurden die positiven Aspekte der zwei Methoden kombiniert. Die Methode der Strahlungsverfolgung in Esp-r ist unkompliziert und schnell. Die Semi-Analytische Methode liefert die vorberechneten detaillierten Sichtfaktoren, die als Datensatz in Esp-r eingelesen werden und die Berechnungszeit bei großer

Detailgenauigkeit verbessern. In einer Studie [127] erzielte dieses hier beschriebene Verfahren positive Ergebnisse und wurde in der Kopplung zur Berechnung lokaler MRT-Werte eingesetzt.

### 5.3.3 Modellierung der dezentralen Systeme in Esp-r

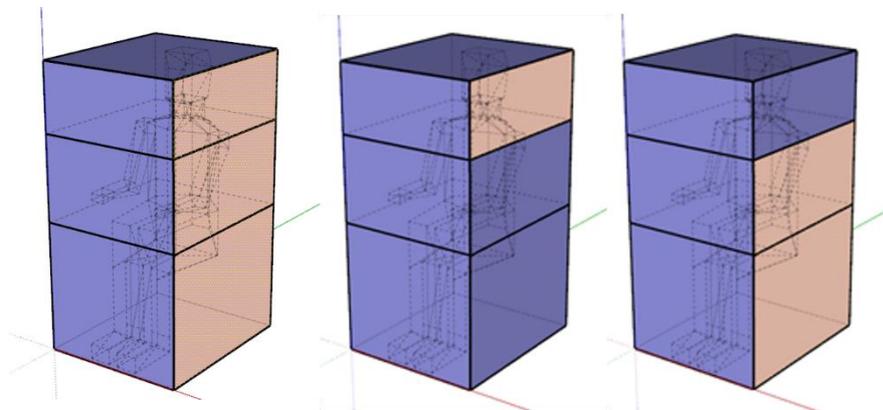
Die zuvor in Kapitel 3 vorgestellten dezentralen Systeme, der Bürostuhl mit Heiz- und Kühlfunktion, die thermoelektrische Heiz- und Kühlwand und der Ventilator wurden in der Gebäudesimulationssoftware mithilfe von PhySCo modelliert.

Die Modellierung wird in der Folge kurz vorgestellt, während die angewandte Regelungslogik in Kapitel 6 präsentiert wird.

#### Modellierung der thermoelektrischen Heiz- und Kühlwand

Die mobile thermoelektrische Heiz- und Kühlwand verfügt über drei einzeln ansteuerbare Zonen. Die Anwendenden können die thermoelektrische Heiz- und Kühlwand in der Gebäudesimulationssoftware Esp-r vereinfacht über die grafische Bedienoberfläche auswählen und mit dem Manikin über den Ansatz „(Wo)Man in Cube“ im Gebäude platzieren.

Die mobile thermoelektrische Heiz- und Kühlwand wurde unter anderem mithilfe von „(Wo)Man in Cube“ implementiert. Basierend auf dem „(Wo)Man in Cube“ Ansatz wurden die Abmessungen der thermoelektrischen Heiz- und Kühlwand an die Abmessungen des Manikins angepasst (Abbildung 5-19).



*Abbildung 5-19: Die thermoelektrische Wand mit dem Ansatz „(Wo)Man in Cube“ mit unterschiedlich aktivierten Zonen, die thermoelektrische Heiz- und Kühlwand befindet sich auf der linken Seite des Manikins*

Die drei Zonen können unabhängig voneinander angesteuert werden (Abbildung 5-19). In der Regelungslogik wird entschieden, welche Zonen zum Heizen oder zum Kühlen entsprechend den globalen und lokalen Empfindungswerten, genutzt werden. Damit wird die „Oberflächentemperatur“ des MRT-Sensors mit einer definierten Temperatur überschrieben und repräsentiert somit auf vereinfachte Weise die thermoelektrische Heiz- und Kühlwand.

Durch verschiedene Sichtfaktordatensätze von „(Wo)Man in Cube“ kann die Distanz des Manikins zur thermoelektrischen Heiz- und Kühlwand verändert werden. In dieser

Arbeit wurde mit einem Abstand von 40 cm zwischen Manikin (Arm-Außenseite) und der Oberfläche der thermoelektrischen Heiz- und Kühlwand gerechnet.

### Modellierung des Bürostuhls mit Heiz- und Kühlfunktion

Der mit Heiz- und Kühlfunktion ausgestattete Bürostuhl verfügt über eine Regelungslogik, die zwei Messbereiche, Rückenfläche und Sitzfläche, steuert. Diese Bereiche können unabhängig voneinander angesteuert werden.

Temperaturänderungen erfolgen jeweils unmittelbar in den beiden Bereichen des imaginären Stuhls. Der Stuhl wurde innerhalb der Regelungslogik implementiert und ist nicht in der grafischen Bedienoberfläche sichtbar. Somit wird PhySCo direkt angesprochen, sollte es zu einer Nutzung der Klimafunktionen des Stuhls kommen.

### Modellierung des Ventilators

Der Ventilator dient zur Erhöhung der Luftgeschwindigkeit im Kopfbereich. Kommt es zur Nutzung des Ventilators, erhöht sich die berücksichtigte Luftgeschwindigkeit innerhalb des Physiologie-Modells für den Kopf. Der Ventilator wurde ähnlich dem Bürostuhl mit Heiz- und Kühlfunktion lediglich in der Regelungslogik implementiert und ist nicht in der grafischen Bedienoberfläche sichtbar.

## 6 Der adaptive Gebäuderegler

Im Folgenden wird nach den allgemeinen Grundlagen ein adaptiver Gebäuderegler für die zentrale Heiz- und Kühlanlage (BCL34) sowie Varianten des Reglers unter Berücksichtigung von dezentralen Systemen vorgestellt. Die Varianten werden mit BCL34\_\* abgekürzt wobei \* eines der dezentralen Systeme oder eine Variation dieser präsentieren kann. Die dezentralen Systeme sind eine thermoelektrische Heiz- und Kühlwand, ein Bürostuhl mit Heiz- und Kühlfunktion und ein Ventilator.

### 6.1 Allgemeine Grundlagen

#### 6.1.1 Regelung und Steuerung

In dieser Arbeit wurde ein Gebäuderegler entwickelt, der die Bestandteile einer Steuerung mit offenem Wirkungsweg enthält. Abbildung 6-1 zeigt die drei Hauptbestandteile einer Steuerung: den Sensor (Fühler), das Steuergerät und den Aktor.

Der Sensor nimmt die Eingangsgröße auf und leitet die Information an das Steuergerät. Dieses wird durch eine Regelungslogik vertreten, in der definierte Sollwerte festgelegt sind [134]. Das Steuergerät verarbeitet und vergleicht die aufgenommene Information mit einem Sollwert in der Regelungslogik. Basierend auf diesem Ergebnis wird eine Handlungsanweisung erstellt, die an den Aktor gesendet wird. Dieser Ablauf wird für jeden Simulationszeitschritt durchgeführt.

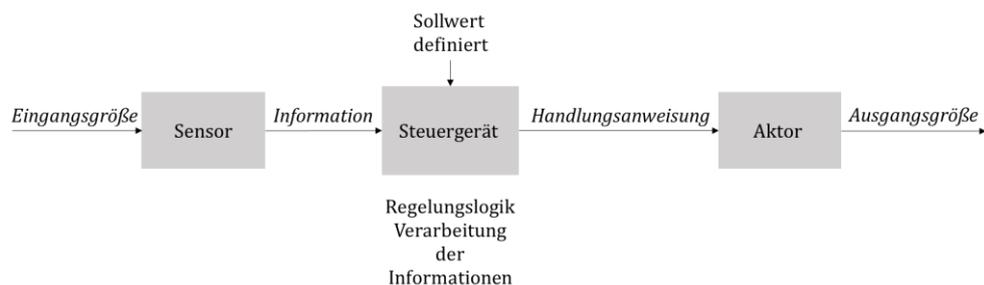


Abbildung 6-1: Grundbestandteile einer Steuerkette mit offenem Wirkungsweg („open loop“), angepasst von [134]

#### 6.1.2 Grundlage des adaptiven Gebäudereglers in Esp-r

Die Kopplung von PhySCo und Esp-r erfolgt über einen weiterentwickelten Basisregler in Esp-r (BCL00). Der Regler wurde dahingehend verändert, dass er die Sollwerte für den unteren und den oberen Sollwert variabel anpassen kann, um möglichst behagliche Raumtemperaturen zu ermöglichen und gleichzeitig, wann immer möglich, einen erweiterten Bereich behaglicher Raumtemperaturen anzustreben (Abbildung 6-2). Durch den erweiterten Bereich behaglicher Raumtemperaturen soll der Heizwärme- und Kühlbedarf gegenüber konventionellen Gebäuderegler mit einem engen Bereich behaglicher Raumtemperaturen reduziert werden können.

Die variable Sollwertanpassung basiert auf Grundlage der Regelungslogik, die die Werte für das globale Empfinden und der globalen Behaglichkeit berücksichtigt. Vor Beginn der Simulation werden die Anfangssollwerte, der untere Sollwert TL<sub>i</sub> und der obere Sollwert TU<sub>i</sub> („i“ für engl. „Initial-Setpointtemperature“) definiert (Abbildung 6-2). Die Innentemperaturen werden nach dem Heiz- und Kühlsollwert kontrolliert.



Abbildung 6-2: Konventioneller Bereich behaglich angenommener Raumtemperaturen gegenüber einem erweiterten Bereich behaglicher Raumtemperaturen durch dynamische Sollwerte TU, TL; die Anfangssollwerte (TU<sub>i</sub>, TL<sub>i</sub>) werden zu Beginn der Simulation definiert

Der Heizsollwert (TL, für engl. „Lower Setpointtemperature“) ist der untere Sollwert (Abbildung 6-2). Unterschreitet die operative Raumtemperatur (T<sub>op</sub>) den unteren Sollwert (TL), wird der Gebäudezone Heizenergie zugeführt. Der Kühlsollwert (TU, für engl. „Upper Setpointtemperature“) ist der obere Sollwert (Abbildung 6-2). Überschreitet die operative Raumtemperatur den oberen Sollwert (TU), wird der Zone Kühlenergie zugeführt (beziehungsweise Energie abgeführt), um die operative Raumtemperatur innerhalb der Sollwertgrenzen zu halten. Die Anfangssollwerte des unteren Sollwertes TL<sub>i</sub> und des oberen Sollwertes TU<sub>i</sub> (Abbildung 6-2) der zentralen Heiz- und Kühlanlage werden zu Beginn der Simulation in der modelleigenen Kontroll-Datei (.ctl) festgelegt (Abbildung 6-3).

Das Gebäudesimulationsprogramm Esp-r enthält in der Hauptroutine (Bcfunc.F) vordefinierte Gebäuderegler (BCL), die an spezifische Problemstellungen angepasst werden können. Die Regler (BCL) sind in der Hauptroutine durchnummeriert (BCL00 bis BCL33). Dem neuen Regler wurde während der Bearbeitung die Bezeichnung BCL34 zugeordnet.

BCL00 berücksichtigt den flächengewichteten mittleren Strahlungsanteil. Zusätzlich wird die Innenlufttemperatur als konvektive Komponente mit einbezogen. Das prozentuale Verhältnis (C) zwischen der Lufttemperatur  $\theta_a$  und der mittleren Strahlungstemperatur  $\theta_r$  kann für den Sensor und den Aktuator getrennt festgelegt werden.

Die gemischte gefühlte Temperatur  $\theta_s$  wird wie folgt berechnet:

$$\theta_s = \frac{\theta_a * C}{100} + \frac{\theta_r * (100 - C)}{100} \quad (6-1)$$

Überschreitet die gefühlte Temperatur  $\theta_s$  den oberen Sollwert TU, wird im nächsten Zeitschritt Wärmeenergie abgeführt (Gleichung 6-2).  $\dot{Q}^*$  repräsentiert den Heizwärme-

und Kühlbedarf des nächsten Zeitschritts. Beim Unterschreiten des unteren Sollwertes TL, wird im nächsten Zeitschritt Wärmeenergie zugeführt (Gleichung 6-3).

$$\theta_s > TU \quad \dot{Q}^* = -\dot{Q} \quad (6-2)$$

$$\theta_s < TL \quad \dot{Q}^* = +\dot{Q} \quad (6-3)$$

Abbildung 6-3 zeigt eine typische Kontrolldatei (.ctl) eines Ein-Zonenmodells ohne Zeitplan. In der Datei sind Informationen zum Sensor (Zeile 7) und Aktor (Zeile 9) enthalten die in Abbildung 6-4 erläutert werden. Zeile 15 enthält Informationen, welche sowohl Einfluss auf die Kopplung und den adaptiven Regler als auch auf den Energieverbrauch des Gebäudes haben. Diese sind gesondert in Tabelle 6-1 aufgeführt.

```
no overall control description supplied
* Building
no zone control description supplied
  1 # No. of functions
* Control function  1
# senses a mix of db T and MRT in office.
-2  1  50  0 # sensor data
# actuates mixed convective/radiant flux in office.
-2  1  50 # actuator data
  1 # all daytypes
  1 365 # valid Mon-01-Jan - Mon-31-Dec
  1 # No. of periods in day: weekdays
  0 34  0.000 # ctl type, law (PhysSCO control), start @
    9. # No. of data items
1000.000 0.000 1000.000 0.000 18.000 26.000 1.00 0.7 0.000
# Function:Zone links
| 1
```

Abbildung 6-3: Typische Kontrolldatei „.ctl“ eines Ein-Zonenmodells

Die maximale Wärme- und Kühlkapazität (Tabelle 6-1) muss dem Gebäude oder der Zone entsprechend angepasst werden. Der untere (TLi) und der obere Anfangssollwert (TU<sub>i</sub>) sollten gemäß dem Ansatz des adaptiven Gebäudereglers relativ niedrig (TL<sub>i</sub>) beziehungsweise hoch (TU<sub>i</sub>) gewählt werden, um bei einem behaglichen Zustand einen breiten Sollwertbereich zu erzielen und somit den Heizwärme- /Kühlbedarf zu reduzieren.

Das Aktivitätslevel/Grundumsatz des Manikins (Tabelle 6-1) wird im Bereich üblicher Büroaktivitäten (0.8 – 1.3 met) festgelegt. Wird ein höheres Aktivitätslevel ausgewählt, müssen neue (Empfindungs-)Sollwerte für das „Sensation and Comfort Model“ berechnet werden (siehe Kapitel 5.1.1).

Der Bekleidungsgrad (Tabelle 6-1) kann nach dem Bekleidungsmodell von Rida et al. [135], variabel gewählt werden oder, wie in dieser Arbeit geschehen, für jede Simulationsperiode (Winter / Übergang / Sommer) als konstanter Wert festgelegt werden.

Tabelle 6-1: Informationen zum Gebäuderegler

Max. Wärmekapazität [W]	Min. Wärmekapazität [W]	Max. Kühlkapazität [W]	Min. Kühlkapazität [W]	Unterer Anfangsollwert $T_{Li}$ [°C]	Oberer Anfangsollwert $T_{Ui}$ [°C]	Aktivitätslevel [met]	Bekleidungsgrad [clo]	Luftfeuchtigkeit [%]
1000	0	1000	0	18	26	1,0	0,7	0

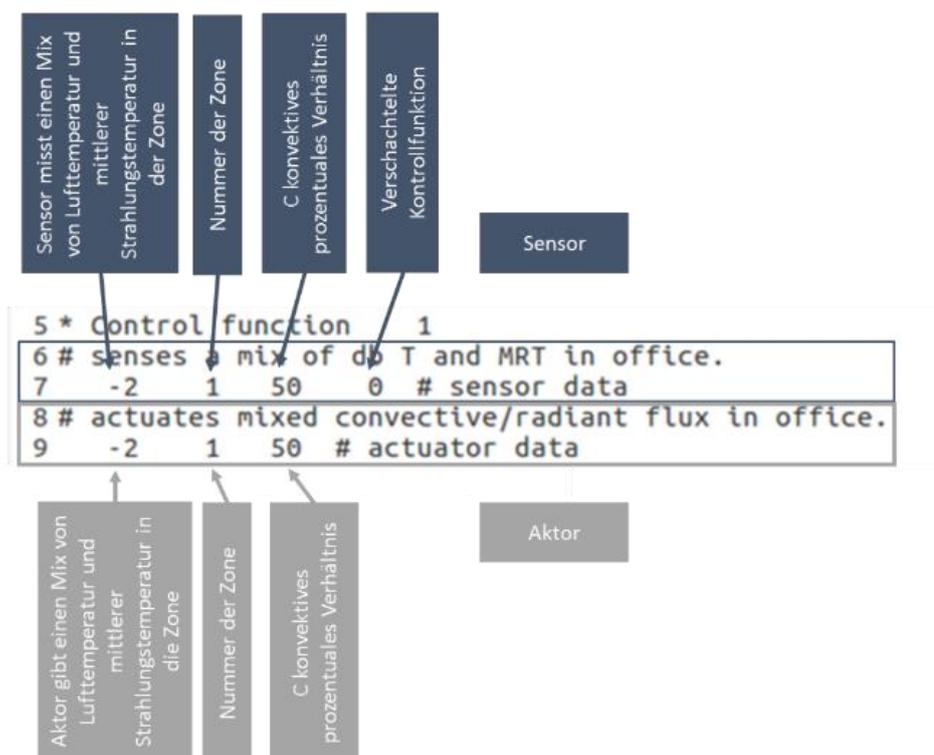


Abbildung 6-4: Auszug der Kontrolldatei, Informationen zu Sensor und Aktor

## 6.2 Regelungslogik des adaptiven Gebäudereglers mit zentralem System

Der adaptive Gebäuderegler BCL34 arbeitet mit den Werten für die globale Behaglichkeit ( $C_o$  für „Overall Comfort“) und dem globalen Empfinden ( $S_o$  für „Overall Sensation“). Im ersten Schritt wird überprüft, ob sich 1.) das Manikin behaglich/unbehaglich fühlt und 2.) bei Unbehaglichkeit, ob es sich kalt/warm fühlt (Abbildung 6-5).

Zeigt das Manikin eine globale Behaglichkeit ( $C_o$ ) größer 1,5 werden die Sollwerte ( $T_U$ ,  $T_L$ ) auf die Anfangsollwerte ( $T_{Ui}$ ,  $T_{Li}$ ) zurückgesetzt (Abbildung 6-5).

Bei einem Behaglichkeitswert ( $C_o$ ) zwischen 0,5 bis 1,5 gilt die „Smoothing“ Bedingung. Das bedeutet, dass die Heiz- und Kühlsollwerte zur Energieeinsparung langsam in Richtung Anfangsollwerte zurückgeführt werden, wenn der globale Behaglichkeitswert innerhalb der Behaglichkeits-Grenzwerte (zwischen 0,5 bis 1,5) liegt. Eine zu schnelle

Sollwertänderung ist innerhalb der obigen Behaglichkeitswerte nicht gewünscht. Die Schrittweite zu den Anfangssollwerten beträgt 0,2 K pro Zeitschritt (Abbildung 6-5).

Fühlt sich das Manikin gerade leicht behaglich (Behaglichkeits-Wert zwischen 0 bis 0,5), verbleiben die Sollwerte auf ihrem aktuellen Wert aus dem vorherigen Zeitschritt der Simulation ( $TU = TU$ ,  $TL = TL$ ) (Abbildung 6-5).

Liegt die globale Behaglichkeit ( $C_o$ ) unter null, das Manikin fühlt sich also nicht mehr behaglich, wird im nächsten Schritt das globale Empfinden ( $S_o$ ) geprüft und es erfolgt eine Sollwertadaptation (Abbildung 6-6).

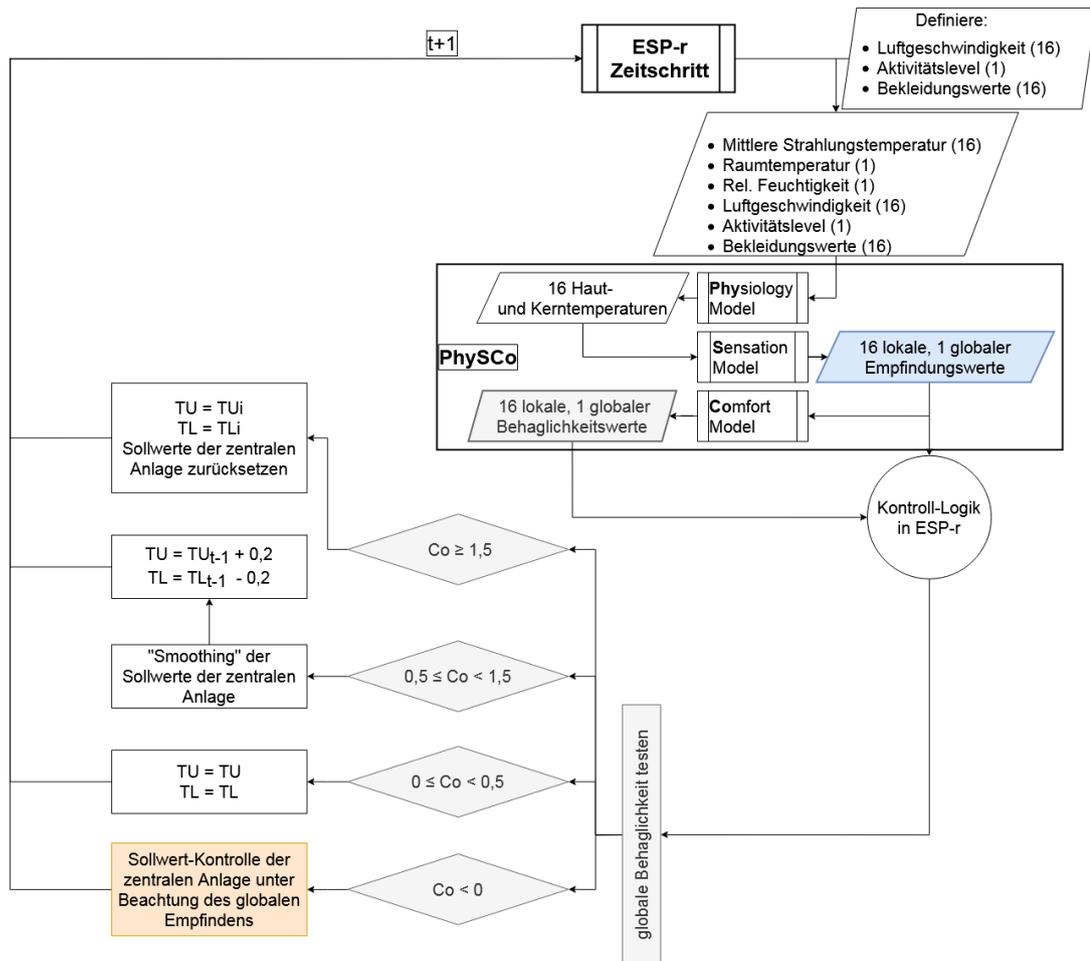


Abbildung 6-5: Regelungslogik des adaptiven Gebäudereglers (BCL34)

Ist der globale Behaglichkeitswert ( $C_o$ ) beispielsweise kleiner null und liegt der Wert des globalen Empfindens  $S_o$  bei zwei (Manikin fühlt sich warm), wird der obere Sollwert  $TU$  schrittweise herabgesetzt, bis die globale Behaglichkeit einen Wert über null (behaglich) erreicht. Überschreitet die operative Raumtemperatur ( $T_o$ ) den oberen Sollwert  $TU$ , springt die zentrale Heiz- und Kühlanlage an und kühlt die Zone.

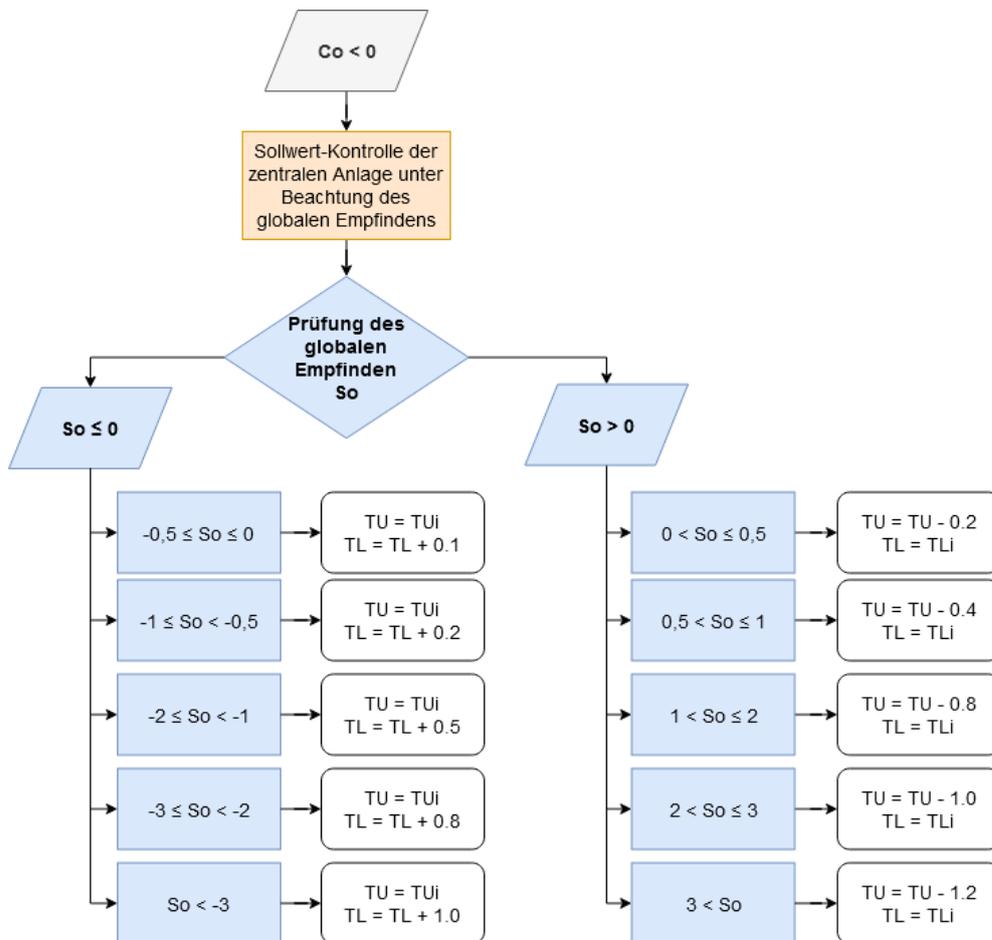


Abbildung 6-6: Detaillierte Regelungslogik aufbauend auf Abbildung 6-5, im Falle eines negativen Behaglichkeitswertes werden die Sollwerte nach dem globalen Empfinden ( $S_o$ ) reguliert

### 6.2.1 Simulationsbeispiel zur adaptiven Sollwertanpassung

Die folgenden Abbildungen sollen die adaptive Sollwertanpassung durch die globale Behaglichkeit ( $C_o$ ) und das globale Empfinden ( $S_o$ ) für den Heiz- und den Kühlfall verdeutlichen.

Abbildung 6-7 zeigt eine Tagessimulation für Mannheim (Deutschland) im Januar mit 4 Zeitschritten pro Stunde und unter Berücksichtigung von Winterbekleidung ( $clo\ 1,0$ ). Durch die Adaption des unteren Sollwertes TL (rot) wird der Heizfall präsentiert. Die Skala des globalen Empfindens ( $S_o$ ) und der globalen Behaglichkeit ( $C_o$ ) wurde auf einen Bereich von -3 bis +3 reduziert. Die Primärachse (links) zeigt die Werte für TU, TL, und  $T_{op}$ , während die Sekundärachse (rechts) die Werte für  $S_o$  und  $C_o$  repräsentiert.

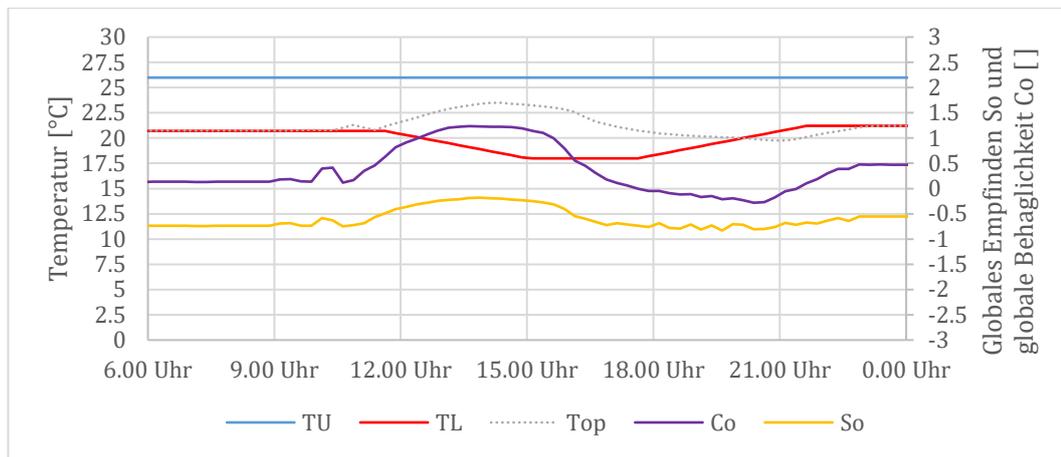


Abbildung 6-7: Sollwertadaption des unteren Sollwertes TL basierend auf den globalen Werten des Empfindens ( $S_o$ ) und der Behaglichkeit ( $C_o$ ) während einer Tagessimulation im Januar für Mannheim (Deutschland)

Abbildung 6-7 zeigt, wie der untere Sollwert TL (rot) auf der Basis der Werte des globalen Empfindens  $S_o$  und der globalen Behaglichkeit  $C_o$  kontrolliert wird. Am Morgen liegt TL und auch die operative Temperatur ( $T_{op}$ ) bereits bei 21 °C, um einen behaglichen Zustand ( $C_o$ ) über null zu halten. Gegen die Mittagszeit steigt die  $T_{op}$  und als Folge  $S_o$  sowie  $C_o$  an, sodass die „Smoothing“ Bedingung erfüllt ist. Die Werte der Behaglichkeit liegen zwischen 0,5 und 1,5, der Sollwert wird langsam auf den Anfangssollwert (TLi) von 18 °C reduziert.

Dieser Anfangssollwert kann für die Dauer von 15 Uhr bis 17:30 Uhr gehalten werden.  $T_{op}$  liegt während dieser Zeit im Bereich von 23,2 °C bis 20,5 °C. Danach unterschreitet die globale Behaglichkeit ( $C_o$ ) einen positiven Wert und fällt unter null, sodass der untere Sollwert TL erneut angehoben wird. Gegen 22 Uhr liegt das Behaglichkeitslevel zwischen null und 0,5, sodass der aktuelle Sollwert nicht verändert wird (siehe Logik).

Abbildung 6-8 zeigt eine Tagessimulation im Monat August unter Berücksichtigung von Sommerbekleidung (clo 0,5). Hier fand eine adaptive Anpassung des oberen Sollwertes TU (blau) während der Mittagszeit statt. Die Skala des globalen Empfindens ( $S_o$ ) und der globalen Behaglichkeit ( $C_o$ ) wurde auf den Bereich von -3 bis +3 reduziert.

Gegen 6:00 Uhr liegt der obere Sollwert TU auf dem Anfangssollwert von  $TU_i = 26$  °C. Die operative Temperatur liegt bei 25 °C. Das globale Empfinden ( $S_o$ ) liegt mit -0,15 im neutralen Bereich. Die globale Behaglichkeit ( $C_o$ ) liegt als Folge im positiven Bereich von 1,2.

Im Laufe des Vormittags steigt  $S_o$  und  $C_o$  sinkt. Während in der Zeit von 6:00 Uhr bis 9:00 Uhr das Behaglichkeitslevel zwischen null bis 0,5 liegt, werden die Sollwerte auf einem konstanten Niveau gehalten. Gegen 9:00 Uhr steigt die  $T_{op}$  weiter an und erreicht einen Wert von rund 26 °C. Das globale Empfinden erreicht einen Wert von 0,9 und die globale Behaglichkeit unterschreitet den Wert von null. Dadurch wird TU herabgesetzt.

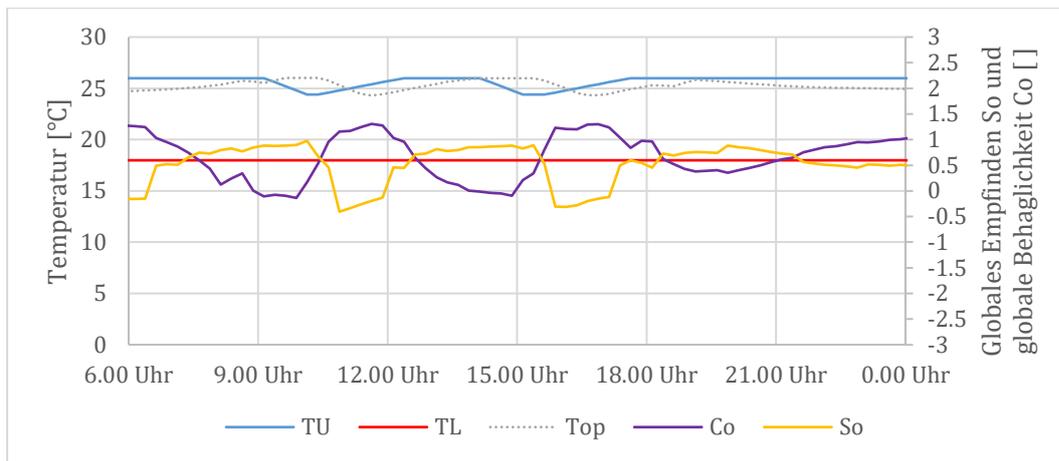


Abbildung 6-8: Sollwertadaption des oberen Sollwertes TU basierend auf den globalen Werten des Empfindens (So) und der Behaglichkeit (Co) während einer Tagessimulation im August für Mannheim (Deutschland)

Um 10:30 Uhr sinkt  $S_o$  bereits noch mal und in Folge steigt  $C_o$ . Bis 11:30 Uhr setzt die „Smoothing Condition“ ein, da  $C_o$  im Bereich von 0,5 bis 1,5 liegt. Somit wird TU langsam zum Anfangssollwert  $TU_i$  von 26 °C zurückgeführt.  $T_{op}$  steigt erneut an, was wiederum einen Anstieg des globalen Empfindens ( $S_o$ ) zur Folge hat. Gegen 14:00 Uhr sinkt die globale Behaglichkeit ( $C_o$ ) unter den Wert von null, sodass TU erneut herabgesetzt wird.

Während der Zeit von 15:00 Uhr bis 16:00 Uhr steigt  $C_o$  kontinuierlich an und durch die „Smoothing Condition“ wird TU erneut in Richtung des Anfangssollwertes von  $TU_i$  (26 °C) geführt. Der Anfangssollwert  $TU_i$  wird gegen 18:00 Uhr erreicht und bis zu Tagesende gehalten, da sich der Wert der globalen Behaglichkeit ( $C_o$ ) im Bereich von 0,4 bis 1,0 bewegt.

## 6.3 Regelungslogik für die dezentralen Heiz- und Kühlsysteme

### 6.3.1 Allgemein

Abbildung 6-9 zeigt das Flussdiagramm aus Abbildung 6-5 mit der zusätzlichen Regler-Schleife für die dezentralen Systeme (Stuhl mit Heiz- und Kühlfunktion, mobile thermoelektrische Heiz- und Kühlwand (ThW) sowie gegebenenfalls Ventilator).

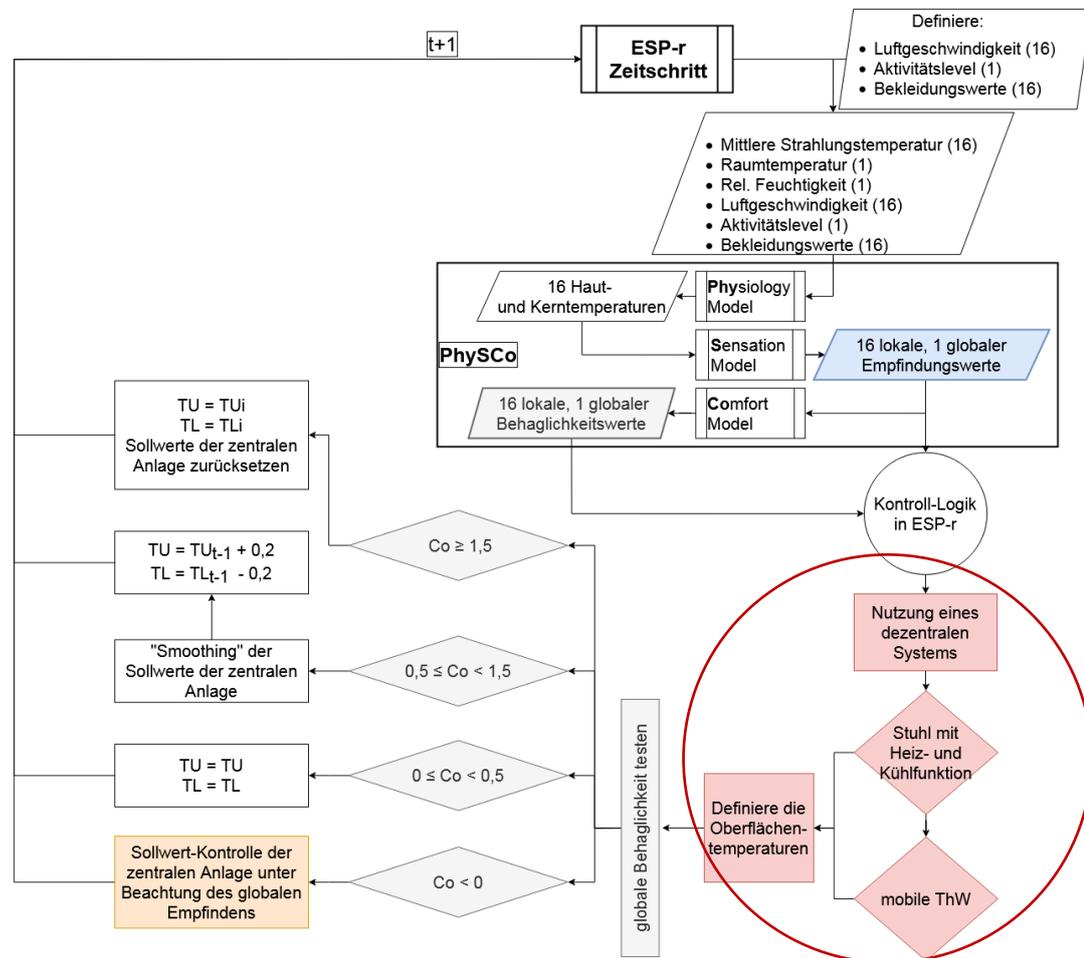


Abbildung 6-9: Flussdiagramm des adaptiven Gebäudereglers BCL34 mit Einbezug der dezentralen Heiz- und Kühlsysteme

### 6.3.2 Adaptiver Gebäuderegler für die thermoelektrische Wand

Durch die kombinierte Nutzung des adaptiven Gebäudereglers und der thermoelektrischen Stellwand (BCL34\_ThW) soll es zu einer weiteren Steigerung der Behaglichkeit und gleichzeitig zu einer Abnahme des Heizwärme- und Kühlbedarfs kommen. Der kombiniert adaptive Gebäuderegler mit den dezentralen Systemen kann zu einer Potenzialabschätzung genutzt werden.

## Regelungslogik der thermoelektrischen Wand

Die thermoelektrische Heiz- und Kühlwand wurde, wie in Kapitel 5.3.3 beschrieben, mithilfe des Ansatzes „(Wo)Man in Cube“ modelliert.

Im ersten Schritt der Regelungslogik ist das globale Empfinden  $S_o$  ausschlaggebend (Abbildung 6-10). Befindet sich  $S_o$  innerhalb der Grenzen zwischen -0,5 bis 1,0, so werden die Zonen über das lokale Empfinden ( $S_l$ ) einzeln angesteuert. Liegt der Wert außerhalb der Grenzen, werden alle drei Zonen der thermoelektrischen Heiz- und Kühlwand gleichzeitig aktiviert, indem die Oberflächentemperatur (Temp) überschrieben wird (Abbildung 6-10).

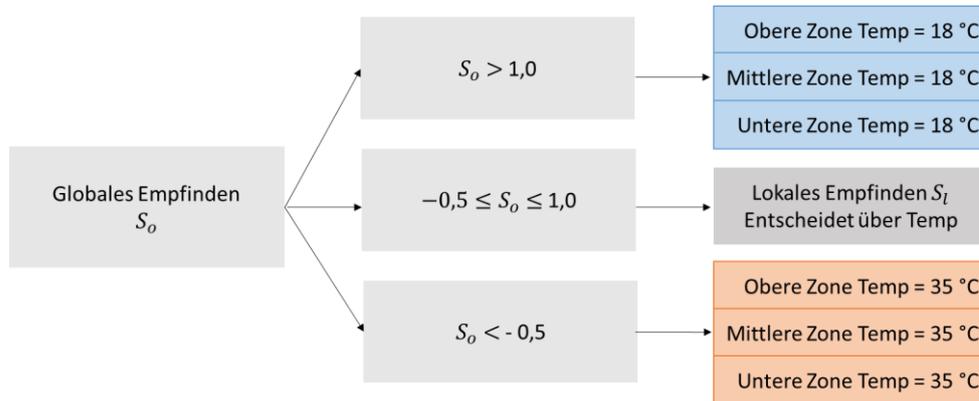


Abbildung 6-10: Erste Entscheidung innerhalb der Regelungslogik der thermoelektrischen Stellwand innerhalb des adaptiven Gebäudereglers („BCL34\_ThW“) nach dem Wert des globalen Empfindens ( $S_o$ )

Liegt  $S_o$  innerhalb der Grenzen von -0,5 bis 1,0 orientiert sich die Regelungslogik an den Sollwerten für das lokale Empfinden ( $S_l$ ) des Kopfes, des Hüftbereichs und der Oberarme oder des Rückenbereichs, je nachdem ob sich die Stellwand auf der Seite oder hinter dem Manikin befindet.

Die Körperteile reagieren unterschiedlich empfindlich auf Kälte und Wärmeeinwirkung [96]. Die Empfindungssollwerte für die Regelungslogik wurden basierend auf Erfahrungswerten aus vorhergehenden Simulationsergebnissen ausgewählt.

Die unsymmetrische Verteilung der Empfindungssollwerte (-0,5 und 1,0) resultiert daraus, dass sich die Strahlungswirkung der Stellwand für die Heizfunktion bei einer Oberflächentemperatur von 35 °C weniger stark auswirkt, weil die Oberflächentemperatur näher im Bereich der Körpertemperatur liegt. Die Wärmeabgabe des Körpers wird reduziert, aber es erfolgt keine zusätzliche Wärmezufuhr. Somit soll die thermoelektrische Stellwand bereits früh bei einem geringen negativen thermischen Empfinden genutzt werden.

Die Kühlfunktion zeigt im Gegenzug mit einer Oberflächentemperatur von 18 °C eine vergleichsweise kühle Oberfläche. Vorhergehende Simulationen haben gezeigt, dass zu frühes Einschalten der Kühlfunktion zu einer verminderten Behaglichkeit führte, weswegen ein Sollwert für das thermische Empfinden von 1,0 festgelegt wurde.

Die Grenzwerte für das thermische Empfinden und die thermische Behaglichkeit orientieren sich an den zuvor vorgestellten Skalen für thermisches Empfinden und thermische Behaglichkeit in Kapitel 4.

Dabei werden je nach lokalem Empfinden dieser Körperpartien die Oberflächentemperaturen der MRT-Sensor-Boxen („(Wo)Man in Cube“) an der jeweiligen Seite und Zone (Obere, Mittlere, Untere) entsprechend Tabelle 6-2 überschrieben. Zum Kühlen wurde eine Temperatur von 18 °C, zum Heizen von 35 °C festgelegt. Befindet sich das lokale Empfinden im neutralen Bereich, wird die Oberflächentemperatur des MRT-Sensors mit der aktuell vorliegenden Raumlufttemperatur (DB) überschrieben.

Tabelle 6-2: Sollwerte (SP) des lokalen Empfindens ( $S_l$ ), die die Oberflächentemperatur der mobilen thermoelektrischen Stellwand (Temp [°C]) regeln

Thermoelektrische Heiz- und Kühlwand (ThW) auf der linken Seite des Manikins							
Zone	Lokales Empfinden ( $S_l$ )	SP Kühlen	Temp [°C]	SP bei Nichtbenutzung	Temp [°C]	SP zum Heizen	Temp [°C]
Obere	Sl_Kopf	$\geq 0,5$	18	$-0,5 < S_l < 0,5$	DB	$S_l \leq -0,5$	35
Mittlere	Sl_Linke Oberarmregion	$\geq 0,5$	18	$-0,5 < S_l < 0,5$	DB	$S_l \leq -0,5$	35
Untere	Sl_Hüftbereich	$\geq 0,5$	18	$-0,5 < S_l < 0,5$	DB	$S_l \leq -0,5$	35

### Simulationsbeispiel zur Aktivierung der thermoelektrischen Wand

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse von Tagessimulationen des adaptiven Gebäuderegler in Kombination mit der Regelungslogik der mobilen thermoelektrischen Heiz- und Kühlwand (BCL34\_ThW).

Abbildung 6-11 zeigt die Werte für das globale ( $S_o$ ) und lokale Empfinden ( $S_l$ ) einer Tagessimulation im Januar für Mannheim. Die schwarze Linie zeigt die Grenze von -0,5 für das globale Empfinden  $S_o$  auf. Abbildung 6-12 verdeutlicht die resultierenden Oberflächentemperaturen der drei Zonen. Die Skala des Empfindens (Abbildung 6-11) wurde im Bereich von 0 bis -1 vergrößert, da sich alle Werte in diesem Bereich befinden.

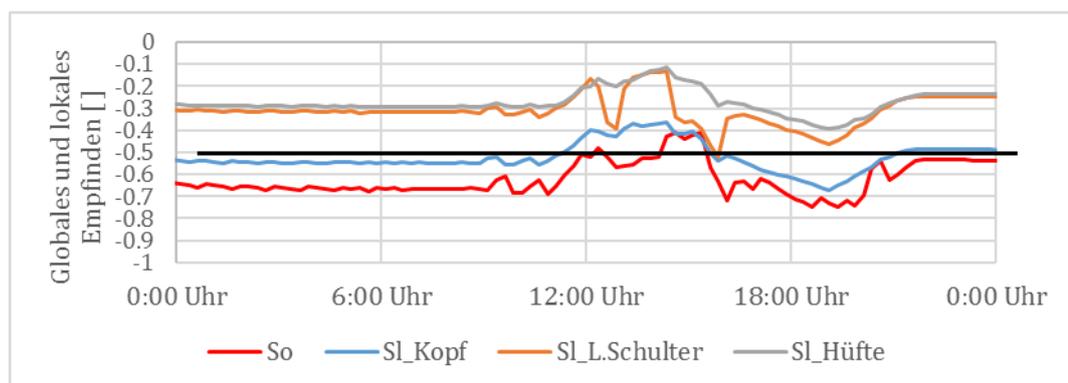


Abbildung 6-11: Werte des globalen ( $S_o$ ) und lokalen ( $S_l$ ) Empfindens während einer Tagessimulation im Januar mit dem kombiniert adaptiven Gebäuderegler mit thermoelektrischer Heiz- und Kühlwand (BCL34\_ThW)

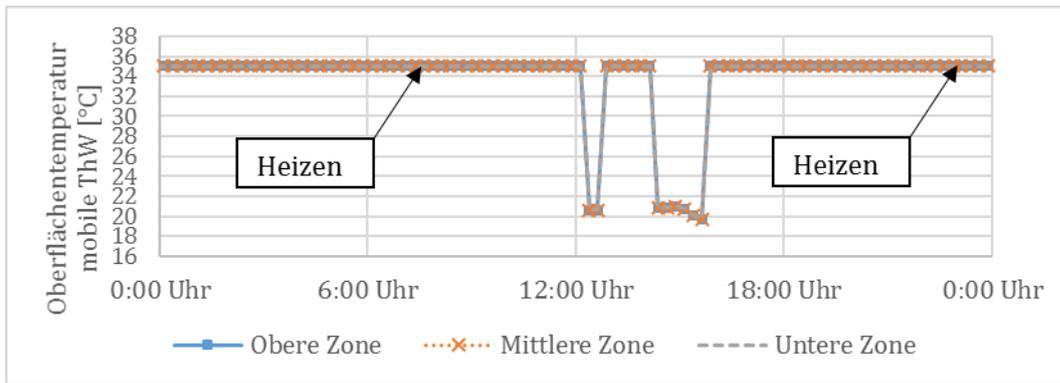


Abbildung 6-12: Aktivierte Oberflächentemperaturen der drei Zonen der mobilen thermoelektrischen Stellwand gemäß den kontrollierenden Empfindungswerten aus Abbildung 6-11 während einer Tagessimulation im Januar

Gemäß den vorher gezeigten Bedingungen aus Abbildung 6-10 und Tabelle 6-2 ist während der Simulation überwiegend das globale Empfinden ausschlaggebend für die Regulierung der drei Zonen (Abbildung 6-12).

Abbildung 6-11 zeigt, dass  $S_o$  oft unter einem Wert von  $-0,5$  liegt. In diesem Fall werden alle drei Zonen geheizt ( $35\text{ °C}$ ) (Abbildung 6-12). Lediglich um die Mittagszeit werden alle drei Zonen für kurze Zeit nicht genutzt. Dabei sinkt die Oberflächentemperatur auf den Wert der aktuellen Raumtemperatur im Bereich zwischen  $20\text{ °C}$  bis  $22\text{ °C}$ . Aus der Abbildung 6-11 ist ersichtlich, dass sowohl das globale Empfinden als auch die lokalen Empfindungswerte von Kopf, linke Schulter und Hüfte über einem Wert von  $-0,5$  liegen. Zur Verdeutlichung des Einflusses der thermoelektrischen Wand werden die entsprechenden lokalen Empfindungswerte  $S_l$  (Abbildung 6-13) und die lokalen Behaglichkeitswerte  $C_l$  (Abbildung 6-14) des linken und des rechten Oberarms verglichen. Die thermoelektrische Stellwand befand sich auf der linken Seite des Manikins.

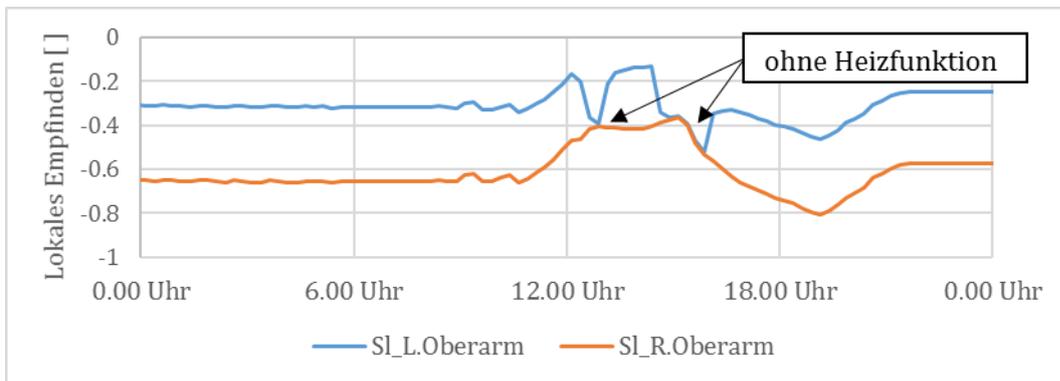


Abbildung 6-13: Vergleich der lokalen Empfindungswerte ( $S_l$ ) des linken und des rechten Oberarms während einer Tagessimulation im Januar mit der thermoelektrischen Stellwand

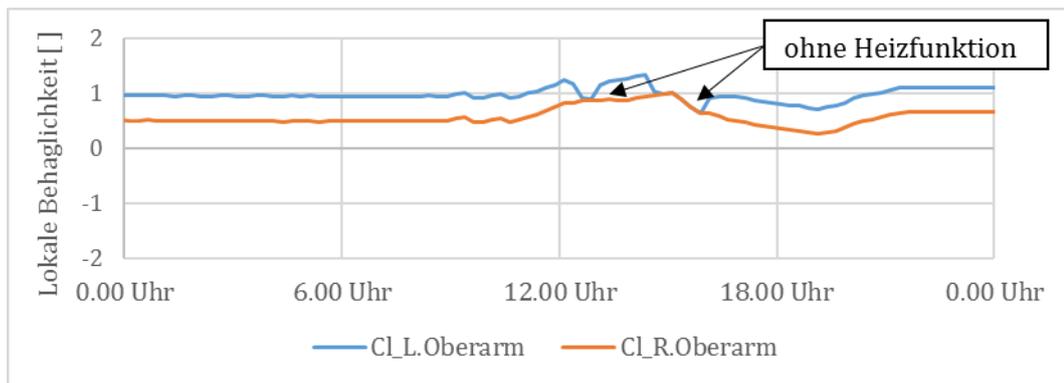


Abbildung 6-14: Vergleich der lokalen Behaglichkeit ( $C_i$ ) des linken und des rechten Oberarms während einer Tagessimulation im Januar mit der thermoelektrischen Stellwand

Bei Nutzung der mobilen thermoelektrischen Heiz- und Kühlwand zeigt sich deutlich ein Unterschied im thermischen Empfinden (Abbildung 6-13) und der lokalen Behaglichkeit (Abbildung 6-14) des linken und rechten Oberarms.

Der  $C_i$  des linken Oberarms liegt deutlich über dem des rechten Oberarms. Es zeigt sich auch, dass es nach Abschalten der mobilen Stellwand gegen 13 Uhr zu einer deutlichen Absenkung sowohl des thermischen Empfindens (Abbildung 6-13) als auch der lokalen Behaglichkeit (Abbildung 6-15) des linken Arms kommt, wobei der rechte Arm unbeeinflusst bleibt. Während dieser Zeit sinken das thermische Empfinden und die thermische Behaglichkeit des linken Arms auf das Niveau des rechten Arms. Nach erneutem Anschalten der mobilen thermoelektrischen Stellwand zeigen sowohl das lokale Empfinden (Abbildung 6-13) als auch der lokale Behaglichkeitswert des linken Arms nach einer leichten Senkung einen deutlichen Anstieg (Abbildung 6-14).

Abbildung 6-15 zeigt die Werte von  $S_o$  und  $S_i$  während einer Tagessimulation im August für Mannheim. Abbildung 6-16 zeigt entsprechend die kontrollierten Oberflächentemperaturen der mobilen Stellwand. Die Sollwerte des thermischen Empfindens  $S_o$  zur Aktivierung der thermoelektrischen Stellwand sind mittels der schwarzen Linien markiert.

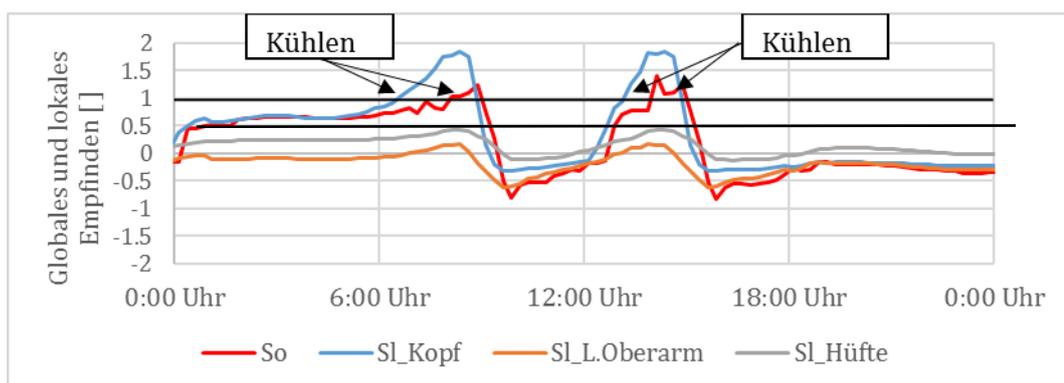


Abbildung 6-15: Werte des globalen ( $S_o$ ) und lokalen ( $S_i$ ) Empfindens während einer Tagessimulation im August für Mannheim mit dem adaptiven Gebäuderegler und der mobilen thermoelektrischen Stellwand („BCL34\_ThW“)

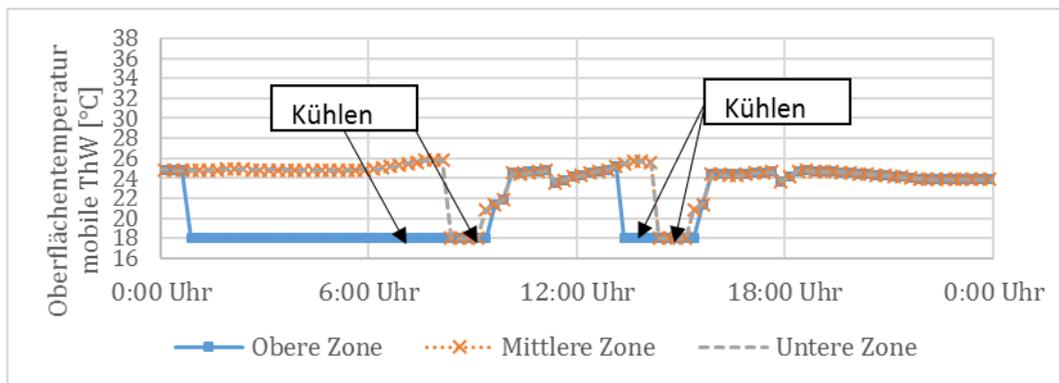


Abbildung 6-16: Aktivierte Oberflächentemperaturen der drei Zonen der mobilen thermoelektrischen Stellwand gemäß den kontrollierenden Empfindungswerten aus Abbildung 6-15 während einer Tagessimulation im August für Mannheim

Abbildung 6-16 verdeutlicht, dass die obere Zone, die über die Empfindungswerte des Kopfes  $S_{L,Kopf}$  (Abbildung 6-15) reguliert wird, in der Nacht bei einer konstanten Oberflächentemperatur von 18 °C zum Kühlen genutzt wurde.

In den Morgenstunden steigen sowohl das lokale Empfinden des Kopfes als auch das globale Empfinden deutlich an (Abbildung 6-15), sodass gegen 8 Uhr auch die mittlere und die untere Zone der thermoelektrischen Stellwand zum Kühlen mit einer Oberflächentemperatur von 18 °C genutzt wurden (Abbildung 6-16). Hierfür war der Wert des globalen Empfindens  $S_o$  verantwortlich, der in Abbildung 6-15 den Grenzwert von 1 (schwarze Linie) übersteigt.

Um die Mittagszeit liegen alle Empfindungswerte innerhalb der Grenzen von -0,5 bis 0,5, sodass die drei Zonen der mobilen thermoelektrischen Stellwand mit der aktuellen Raumtemperatur überschrieben werden. Um 13:30 Uhr übersteigt das lokale Empfinden des Kopfes einen Wert von 0,5 (Abbildung 6-15), sodass die obere Zone der thermoelektrischen Wand zum Kühlen genutzt wird (Abbildung 6-16). Wenig später übersteigt das globale Empfinden einen Wert von 1 und alle drei Zonen werden zum Kühlen genutzt.

In Abbildung 6-17 sind die lokalen Empfindungswerte ( $S_i$ ) des linken und rechten Oberarms während der oben gezeigten Tagessimulation dargestellt. Abbildung 6-18 zeigt die lokalen Werte der Behaglichkeit ( $C_i$ ) für den linken und den rechten Oberarm während dieser Simulation.

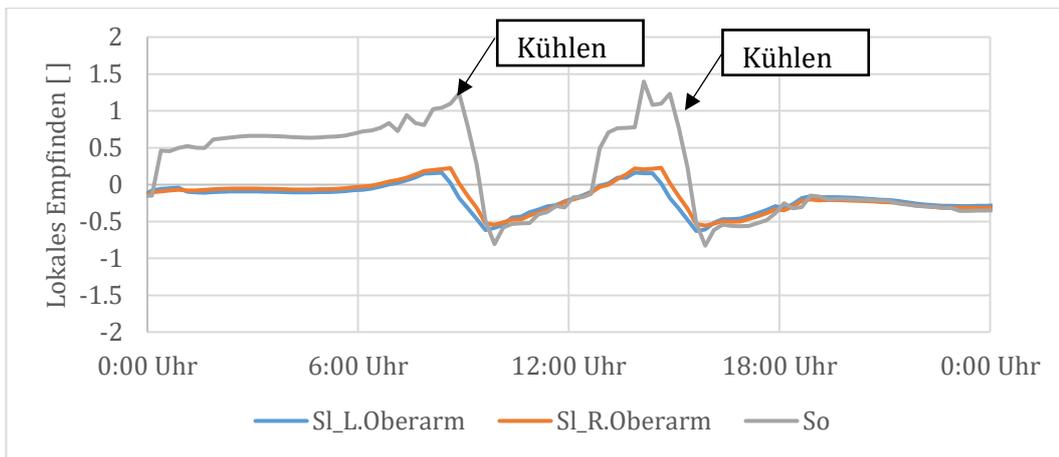


Abbildung 6-17: Vergleich der lokalen Empfindungswerte ( $S_i$ ) des linken und des rechten Oberarms während einer Tagessimulation im August für Mannheim mit dem adaptiven Regler mit der thermoelektrischen Heiz- und Kühlwand (BCL34\_ThW), die Kühlfunktion wurde zweimal durch das globale Empfinden ( $S_o$ ) ausgelöst

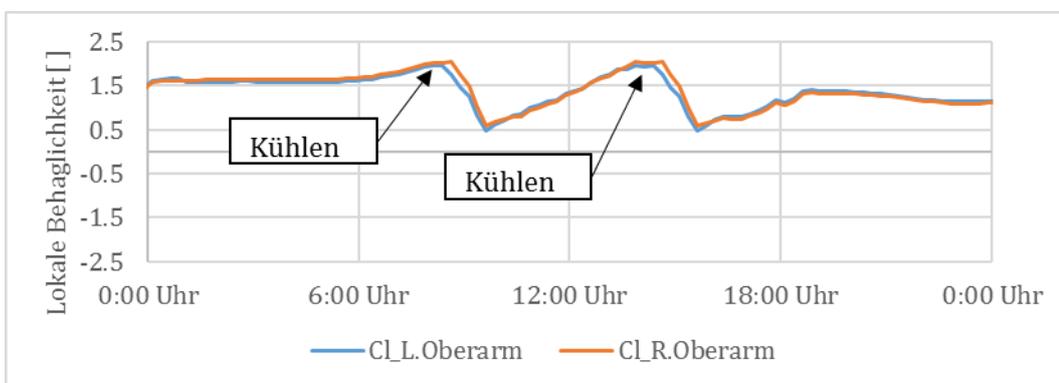


Abbildung 6-18: Vergleich der lokalen Behaglichkeit ( $C_i$ ) des linken und des rechten Oberarms während einer Tagessimulation im August für Mannheim mit dem adaptiven Regler mit der thermoelektrischen Heiz- und Kühlwand (BCL34\_ThW)

Da die mittlere Zone der thermoelektrischen Stellwand (Abbildung 6-16) nur zweimal zum Kühlen (gegen 8:30 Uhr und gegen 14:30 Uhr) genutzt wurde, können für das lokale Empfinden (Abbildung 6-17) und die lokale Behaglichkeit (Abbildung 6-18) keine großen Differenzen gesehen werden. Die mittlere Zone wurde zweimal durch das globale Empfinden ( $S_o$ ) aktiviert, welches einen Wert von 1 überschritten hatte (Abbildung 6-15).

In Abbildung 6-17 lässt sich erkennen, dass der linke Oberarm bei den zwei Kühl-Ereignissen der Stellwand gegen 8:30 Uhr und 14:30 Uhr minimal kühler als der rechte Oberarm ist. Parallel sinkt die lokale Behaglichkeit des linken Oberarms im Vergleich zum rechten Oberarm (Abbildung 6-18).

### 6.3.3 Adaptiver Gebäuderegler für den Bürostuhl mit Heiz- und Kühlfunktion

Die Regelungslogik für dieses zusätzliche System innerhalb der dezentralen Systeme wird der Regelungslogik der zentralen Heiz- und Kühlanlage vorausgestellt (Abbildung 6-9). Hier sei noch mal erwähnt, dass die dezentralen Systeme einzeln oder in

Kombination (thermoelektrische Stellwand mit dem Bürostuhl sowie Ventilator) genutzt werden können.

### Grundlage der Regelungslogik des Bürostuhls mit Heiz- und Kühlfunktion

Die Aktivierung der Klimafunktionen erfolgt rein über die Werte des globalen Empfindens ( $S_o$ ). Werden die Stuhloberflächen klimatisiert, hat dies einen Einfluss auf die lokalen Körperteile von Rücken, Hüfte und Oberschenkeln. Werden die Grenzwerte des globalen Empfindens ( $S_o$ ) über- oder unterschritten, reagiert der Stuhl mit einer entsprechenden Anpassung der Oberflächentemperatur (Abbildung 6-19).

Bei intern durchgeführten Temperaturmessungen konnten mit der Heiz- und Kühlfunktion des Stuhls  $\pm 3$  Kelvin Temperaturdifferenz an der Hautoberfläche der entsprechenden Körperteile festgestellt werden, sodass die Temperaturänderungen der Stuhloberfläche mit  $\pm 4$  Kelvin für den Kühl- und den Heizfall angenommen wurde (siehe Anhang IV). Die Differenz erklärt sich aus dem Bekleidungs-widerstand. Hier muss die Ausgangstemperatur etwas höher gewählt werden, um einen lokalen Effekt zu erreichen (Abbildung 6-19).

Diese Temperaturänderungen wurden für den nächsten Zeitschritt in der Simulation übernommen. Die Temperierung wird im Physiologie-Modell innerhalb der Gleichung durch  $t_{eq}$  dargestellt (Gleichungen 6-4, 6-5).

Für die Heizfunktion:

$$t_{eq} = \left( 0,55t_a + 0,45\bar{t}_r + \frac{0,24-0,75\sqrt{v_a}}{1+I_{cl}} (36,5 - t_a) \right) + 4 K \quad (6-4)$$

Für die Kühlfunktion:

$$t_{eq} = \left( 0,55t_a + 0,45\bar{t}_r + \frac{0,24-0,75\sqrt{v_a}}{1+I_{cl}} (36,5 - t_a) \right) - 4 K \quad (6-5)$$

Die Temperatur  $t_{eq}$  wird bei Nutzung des Bürostuhls ohne Aktivierung der Heiz- oder Kühlfunktion und für die Körperteile, die nicht im direkten Kontakt mit der Stuhloberfläche stehen (Kopf, Brustbereich, Oberarme, usw.) nach der folgenden Gleichung errechnet.

$$t_{eq} = \left( 0,55t_a + 0,45\bar{t}_r + \frac{0,24-0,75\sqrt{v_a}}{1+I_{cl}} (36,5 - t_a) \right) \quad (6-6)$$

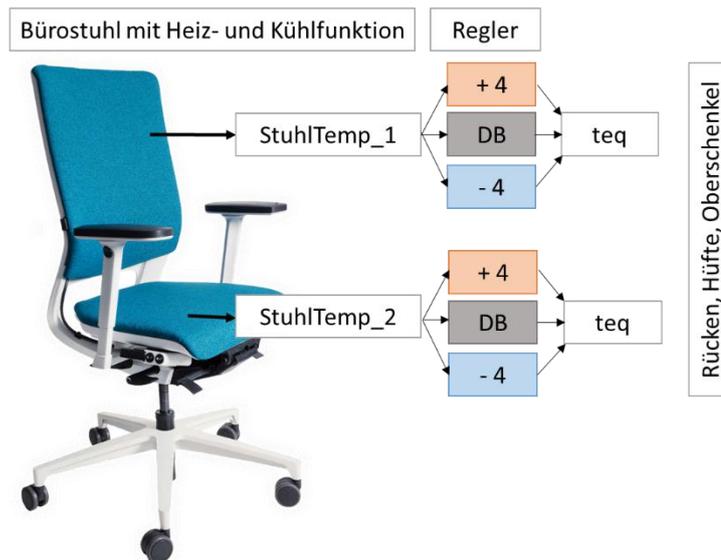


Abbildung 6-19: Vereinfachter Ablauf des Reglers für den Bürostuhl mit Heiz- und Kühlfunktion für die lokalen Körperteile Rücken, Hüfte und Oberschenkel

### Regelungslogik des Bürostuhls mit Heiz- und Kühlfunktion

Die Entscheidung zur Temperierung des Stuhls erfolgt innerhalb der Regelungslogik für den Bürostuhl mit Heiz- und Kühlfunktion gemäß Abbildung 6-20. Das globale Empfinden ( $S_o$ ) ist ein Steuerungsparameter. In Abhängigkeit der vorliegenden Bedingungen werden die entsprechenden Klimafunktionen für die Stuhllehne (StuhlTemp\_1) oder das Sitzkissen (StuhlTemp\_2) aktiviert.

Durch die Temperaturänderungen werden die lokalen Körperteile Rücken, Hüftbereich und Oberschenkel innerhalb des Physiologie-Modells angesprochen. Der Rücken und der Hüftbereich werden durch die Rückenlehne (StuhlTemp\_1), die Oberschenkel werden durch das Sitzkissen (StuhlTemp\_2) beeinflusst.

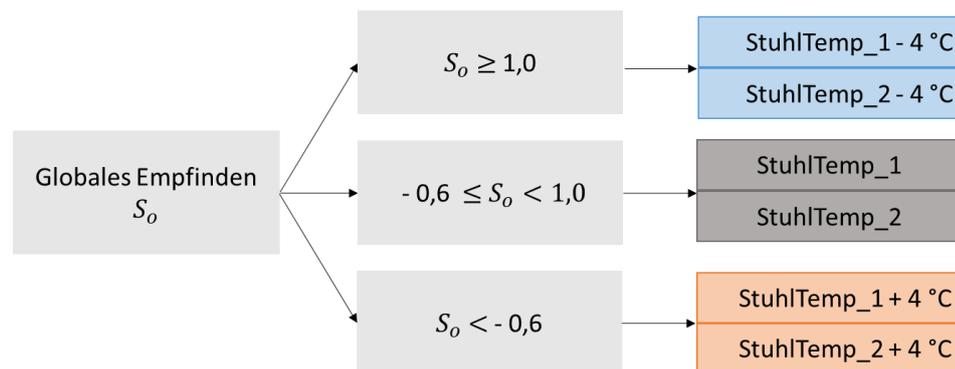


Abbildung 6-20: Regelungslogik des Bürostuhls mit Heiz- und Kühlfunktion, StuhlTemp\_1 entspricht der Lehne, StuhlTemp\_2 entspricht dem Sitzkissen

Bei einer Nutzung der Kühlfunktion kommt es gleichzeitig zu einer erhöhten Luftgeschwindigkeit von 0,1 m/s auf 0,41 m/s für die entsprechenden Körperteile, was zu einer weiteren Kühlung der entsprechenden Körperteile führt.

Die Sollwerte wurden basierend auf den Ergebnissen vorhergehender Simulationsergebnisse ermittelt. Um ein rasches Abkühlen des Manikins zu verhindern, wurde der Empfindungs-Sollwert zum Heizen entsprechend niedrig gewählt (-0,6). Auch hier gilt ähnlich der thermoelektrischen Wand, dass die Heiz- und Kühlfunktion lediglich einen Teil der 16 Körperteile anspricht und nicht alle. Bei der Kühlfunktion hat sich der Empfindungssollwert von 1,0 als passend herausgestellt. Niedrigere Sollwerte zur Nutzung der Kühlfunktion führten zu einem unbehaglichen Zustand.

### Simulationsbeispiel zur Aktivierung des Bürostuhls mit Heiz- und Kühlfunktion

In Abbildung 6-21 und Abbildung 6-22 werden die Simulationsergebnisse bei Aktivierung des Klimastuhls bei einer Tagessimulation für Mannheim im Januar dargestellt. Stuhllehne und Sitzkissen wurden stets gleich temperiert.

Die Ergebnisse aus Abbildung 6-21 zeigen eine Tagessimulation im Januar, bei der die Heizfunktion des Bürostuhls genutzt wurde. Hierbei steigt die Temperatur der Rückenlehne und des Sitzkissens (StuhlTemp\_1, StuhlTemp\_2) um 4 Kelvin im Vergleich zur Raumtemperatur (DB) an. Wird die Heizfunktion nicht genutzt, entspricht die Temperatur der Raumtemperatur (DB). Die Raumtemperatur sowie die Stuhltemperaturen werden auf der Primärachse (links) abgebildet.

Der Grenzwert des globalen Empfindens ( $S_o$ ) ist mit der schwarzen Linie dargestellt und liegt bei - 0,6. Fällt das globale Empfinden unter diesen Grenzwert, wird die Heizfunktion des Stuhls zugeschaltet. Das globale Empfinden wird auf der Sekundärachse (rechts) dargestellt.

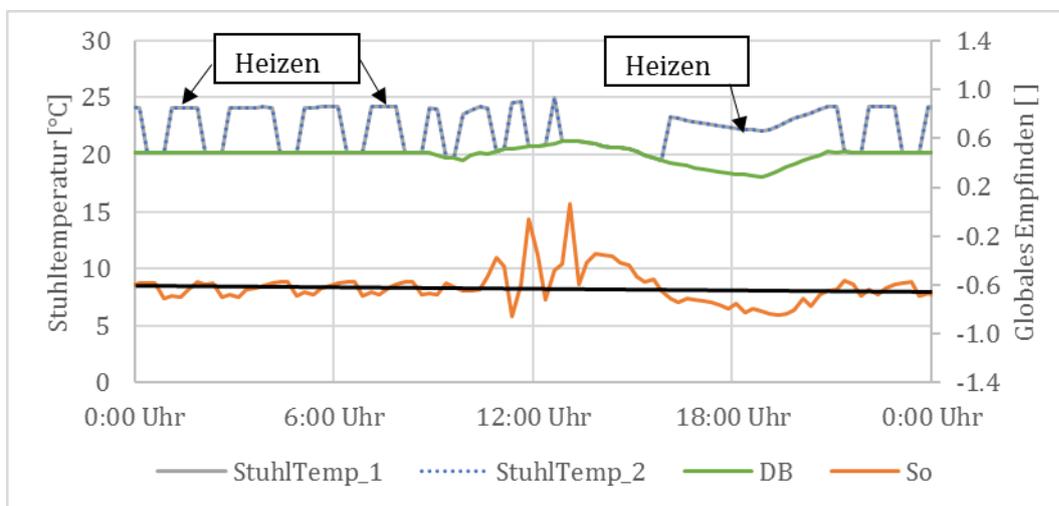


Abbildung 6-21: Globales Empfinden ( $S_o$ ) und Aktivierung des Bürostuhls zum Heizen, Tagessimulation im Januar für Mannheim, StuhlTemp\_1 entspricht der Lehne und StuhlTemp\_2 entspricht der Sitzfläche

Auffällig ist die hohe Frequenz der Oszillation der Heizfunktion in den frühen Nacht- und Morgenstunden gegenüber dem Verlauf in den Tagstunden mit wesentlich geringerer Oszillation. Dies bedeutet, dass es in den frühen Morgenstunden häufig zu einer Nutzung

der Heizfunktion kommt. Im Gegensatz dazu sind die Temperaturveränderungen am Mittag im zeitlichen Verlauf weniger stark ausgeprägt.

Abbildung 6-22 zeigt die lokalen Werte des Empfindens ( $S_i$ ) und der Behaglichkeit ( $C_i$ ) für den Rücken entsprechend dem Tag aus Abbildung 6-21. Die Ergebnisse zeigen, dass das lokale Empfinden durch die Nutzung der Heizfunktion beeinflusst wird. Die lokale Behaglichkeit ( $C_i$ ) folgt dem lokalen ( $S_i$ ) und dem globalen Empfinden ( $S_o$ ).  $C_i$  nimmt beispielsweise während der ersten Tageshälfte oft ab, während  $S_i$  steigt. Während der zweiten Tageshälfte steigt die lokale Behaglichkeit mit dem lokalen Empfinden und liegt über einem Wert von 2.

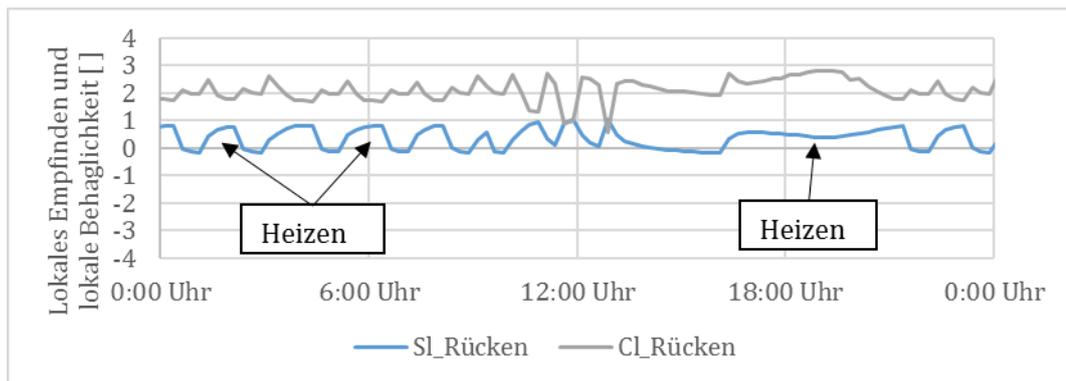


Abbildung 6-22: Lokales Empfinden ( $S_i$ ) und lokale Behaglichkeit ( $C_i$ ) für den Rücken, beeinflusst durch die Nutzung des Bürostuhls mit Heizfunktion an einem Tag im Januar für Mannheim

Abbildung 6-23 zeigt Simulationsergebnisse für einen Tag im August. Abbildung 6-24 repräsentiert die entsprechenden lokalen Werte für das thermische Empfinden ( $S_i$ ) und die Behaglichkeit ( $C_i$ ) des Rückens bei Aktivierung des Bürostuhls.

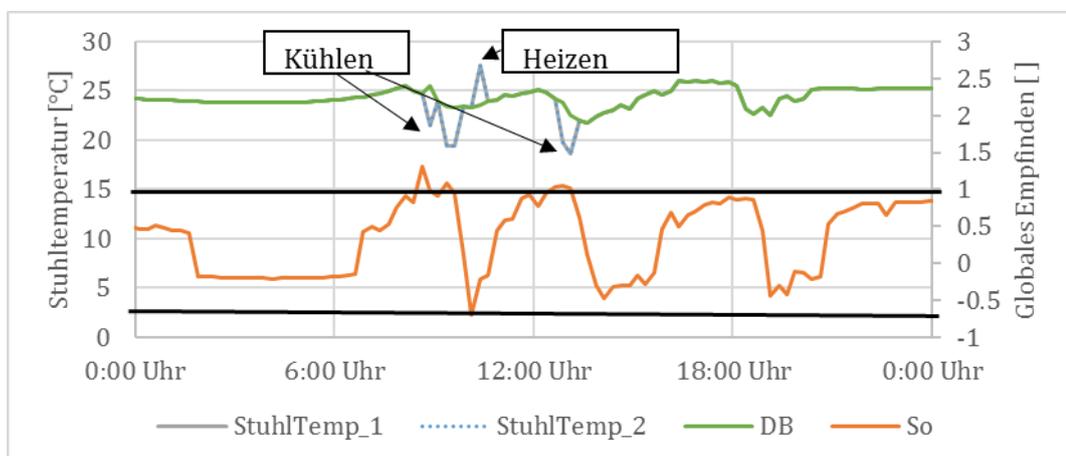


Abbildung 6-23: Globales Empfinden ( $S_o$ ) und Aktivierung des Stuhls zum Kühlen und Heizen an einem Tag im August für Mannheim, StuhlTemp\_1 entspricht der Lehne und StuhlTemp\_2 entspricht der Sitzfläche

Die schwarzen Linien (Abbildung 6-23) zeigen die Grenzen des globalen Empfindens bei -0,6 und +1,0. Liegt  $S_o$  innerhalb der Grenzen wird die Klimatisierung des Stuhls nicht genutzt. Bei Überschreitung des oberen Grenzwertes von 1,0 um 9:00 Uhr, um 9:30 Uhr sowie um 13:30 Uhr, wird die Kühlfunktion genutzt. Einmal unterschreitet  $S_o$  den unteren Grenzwert von -0,6, sodass die Heizfunktion genutzt wird. In Abbildung 6-24

zeigt sich ein deutlicher Effekt im thermischen Empfinden ( $S_i$ ) in dessen Folge es zu einer Steigerung der thermischen Behaglichkeit ( $C_i$ ) kommt. Nach Kühlung des Bürostuhls kommt es zu einer Steigerung der lokalen Behaglichkeit im Bereich des Rückens (Abbildung 6-24). Nach Heizen des Bürostuhls kommt es zu einer Steigerung des thermischen Empfindens mit anfänglicher Steigerung der lokalen Behaglichkeit, bis diese dann im weiteren Verlauf abnimmt. Nach Nutzung der Kühlfunktion um 13:30 Uhr zeigt sich noch einmal eine Steigerung der lokalen Behaglichkeit.

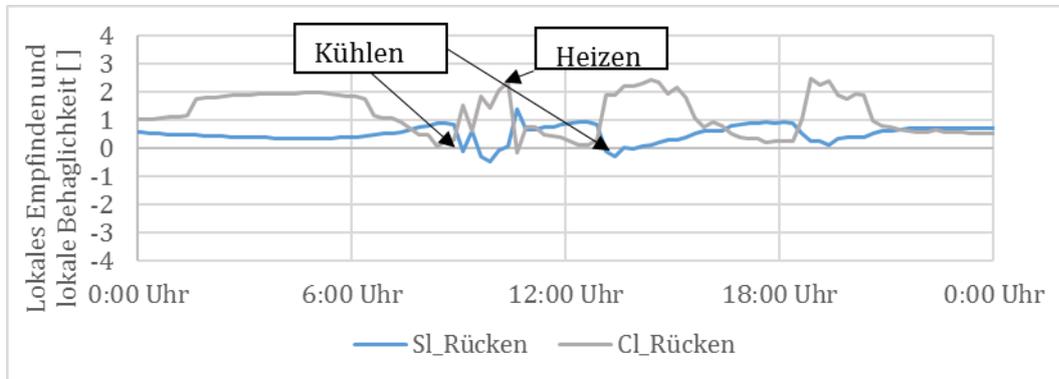


Abbildung 6-24: Lokales Empfinden ( $S_i$ ) und lokale Behaglichkeit ( $C_i$ ) für den Rücken beeinflusst durch die Nutzung des Bürostuhls mit Kühlfunktion und Heizfunktion an einem Tag im August für Mannheim

#### 6.3.4 Adaptiver Gebäuderegler für den Ventilator

##### Grundlage der Regelungslogik für den Ventilator

Die Regelungslogik für den Ventilator wird der Regelungslogik der zentralen Heiz- und Kühlanlage vorausgestellt (Abbildung 6-9). Der Ventilator kann einzeln oder in Kombination mit dem Bürostuhl mit Heiz- und Kühlfunktion und der thermoelektrischen Heiz- und Kühlwand genutzt werden.

Die Regelungslogik (Abbildung 6-6) wurde dahingehend ergänzt, dass bei Überschreiten eines lokalen Empfindungswertes des Kopfes  $S_i$  von 0,8 auf der Empfindungsskala (Kapitel 4) innerhalb der Kopplung die Luftgeschwindigkeit für den Kopf von 0,1 m/s auf 1 m/s erhöht wird. Die Erhöhung der Luftgeschwindigkeit wird unabhängig von der globalen Behaglichkeit durchgeführt und basiert auf Werten, die in zuvor durchgeführten Simulationen ermittelt wurden. Die Nutzung des Ventilators ist hauptsächlich für die wärmeren Perioden angedacht, in denen auch die zentrale Anlage zur Kühlung genutzt wird.

##### Regelungslogik des Ventilators

Die Aktivierung des Ventilators erfolgt rein über den lokalen Empfindungswert des Kopfes ( $S_{i,Kopf}$ ). Bei einem lokalen Empfindungswert kleiner 0,8 bleibt der Ventilator ausgeschaltet. Überschreitet das lokale Empfinden einen Wert über 0,8, wird der Ventilator eingeschaltet (Abbildung 6-25).

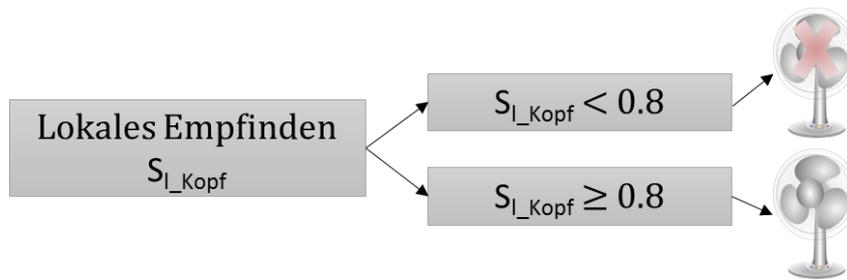


Abbildung 6-25: Vereinfachter Regler-Ablauf für den Ventilator

Die Aktivierung des Ventilators äußert sich direkt im Physiologie-Modell (Kapitel 4.1) innerhalb PhysCo durch eine Erhöhung der Luftgeschwindigkeit  $v_a$  von 0,1 m/s auf 1,0 m/s für den Kopf innerhalb der folgenden Gleichung:

$$t_{eq} = \left( 0,55t_a + 0,45\bar{t}_r + \frac{0,24 - 0,75\sqrt{v_a}}{1 + I_{cl}} (36,5 - t_a) \right) \quad (6-7)$$

Zur Berechnung des Stromverbrauchs wurde zum Erreichen eines Luftstroms von 1 m/s im Gesichtsbereich nach der Studie von Zhai et al. eine elektrische Leistung von 7 Watt ermittelt [136].

### Simulationsbeispiel zur Aktivierung des Ventilators

Abbildung 6-26 zeigt die Simulationsergebnisse bei Aktivierung des Ventilators bei einer Tagessimulation im Mai. Übersteigt das lokale Empfinden des Kopfes  $S_{l\_Kopf}$  den Grenzwert von 0,8 (schwarze Linie), wird der Ventilator aktiviert und der Kopf im nächsten Zeitschritt gekühlt. Unterschreitet das lokale Empfinden den Grenzwert von 0,8, wird der Ventilator nicht genutzt und  $S_{l\_Kopf}$  steigt noch einmal an. Es ist sichtbar, dass die lokale Behaglichkeit bei einem niedrigeren lokalen Empfinden des Kopfes höher liegt als bei höheren Empfindungswerten.

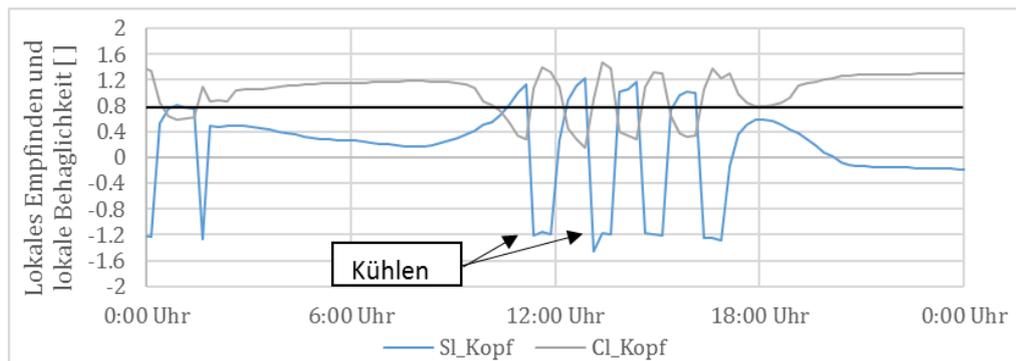


Abbildung 6-26: Lokales Empfinden ( $S_i$ ) und lokale Behaglichkeit ( $C_i$ ) für den Kopf, beeinflusst durch die Nutzung des Ventilators an einem Tag im Mai für Mannheim

## 6.4 Mögliche Kombinationen von Gebäuderegler für zentrale und dezentrale Systeme

Tabelle 6-3 zeigt mögliche Varianten des adaptiven Gebäuderegler mit den dezentralen Systemen der mobilen thermoelektrischen Heiz- und Kühlwand, dem Bürostuhl mit Heiz- und Kühlfunktion oder dem Ventilator.

*Tabelle 6-3: Mögliche Variationen von Gebäuderegler und dezentralen Heiz- und Kühlsystemen*

Gebäuderegler	Zentrale Heiz- und Kühlanlage	Thermoelektrische Heiz- und Kühlwand (ThW)	Bürostuhl mit Heiz- und Kühlfunktion (Stuhl)	Ventilator (Vent)
<b>BCL00</b>	x			
<b>BCL34</b>	x			
<b>BCL34_ThW</b>	x	x		
<b>BCL34_Stuhl</b>	x		x	
<b>BCL34_ThW_Stuhl</b>	x	x	x	
<b>BCL34_Stuhl_Vent</b>	x		x	x
<b>BCL34_ThW_Stuhl_Vent</b>	x	x	x	x

Im folgenden Kapitel werden alle Varianten des adaptiven Gebäuderegler verwendet. Als Referenz dient dabei der Basisregler (BCL00) und der adaptive Regler (BCL34).

## 7 Anwendung verschiedener Varianten des Gebäudereglers

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse des adaptiven Gebäudereglers (BCL34) und der Varianten mit den dezentralen Heiz- und Kühlsystemen vorgestellt. Die Varianten werden in den entsprechenden Kapiteln mit BCL34\_\* gekennzeichnet.

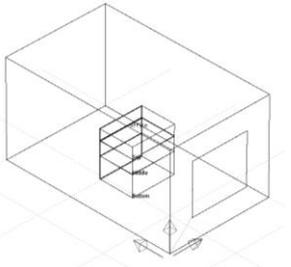
Hier ist vor allem ein möglicher Einfluss der dezentralen Systeme auf die globale Behaglichkeit von Interesse und die Frage, ob bei einem gleichbleibenden Behaglichkeitslevel mithilfe der dezentralen Heiz- und Kühlsysteme eine Reduktion des Heizwärme- und Kühlbedarfs der zentralen Anlage möglich ist. Weiterhin wird der Hilfsenergiebedarf der dezentralen Systeme aufgezeigt. In Kapitel 8 erfolgt dann ein Vergleich der Endenergie unter Berücksichtigung der dezentralen Systeme und einem realen Heiz- und Kühlsystem in Form einer reversiblen Wärmepumpe.

Bei den Simulationen wurde ein virtuelles Gebäudemodell genutzt, das den Heizwärme- und Kühlbedarf zu jeder Zeit optimal zur Verfügung stellen kann.

### 7.1 Gebäudemodell und Simulationsparameter

Die Simulationen basieren auf einem Schuhbox-Modell, das ein Bürozimmer mit einem nach Süden gerichteten Fenster repräsentiert (Tabelle 7-1). Das Verhältnis „Fenster zu Wand“ beträgt 30 %. Ein Manikin befand sich bei den Simulationen, zur Ermittlung des thermischen Empfindens und der Behaglichkeit, mittig im Raum mit Blickrichtung zum Fenster. In allen Fällen, in denen die mobile thermoelektrische Heiz- und Kühlwand genutzt wurde, stand diese auf der linken Seite des Manikins.

Tabelle 7-1: Simulationsparameter

	Beschreibung
Raumgeometrie	5 m lang, 3 m breit, 2,7 m hoch, Fenster-Wand-Verhältnis: 30 %
Wetterdaten	49.48°N, 8.46° E (Mannheim, Germany)
Raumnutzung	Büroraum für eine Person
Zeitplan	ohne
Interne Wärmequellen	1 Mensch, Beleuchtung, Computer,
Ventilation	n = 1,48 [h <sup>-1</sup> ]

Zur Durchführung der Simulationen wurde eine Wetter-Datei aus Mannheim herangezogen, die Klimadaten als stündliche Werte bereitstellt. Die eingehenden Klimadaten beinhalten die Außentemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit, die Werte zur Solarstrahlung und die Windgeschwindigkeiten am jeweiligen Ort (Anhang B).

Als interne Wärmequellen wurden eine Person, ein Computer und die Raumbeleuchtung berücksichtigt. Die internen Lasten waren Tag und Nacht konstant und das Manikin befand sich durchgängig im Raum. Es wurde keine mechanische Belüftung berücksichtigt. Hingegen wurde als Anhaltspunkt ein 1,5-facher Luftwechsel pro Stunde, nach DIN 4108-2 für Nichtwohngebäude, angesetzt [137].

Sowohl die drei Innenwände als auch die Decke und der Boden wurden als adiabatisch betrachtet. Durch diese Konstruktionen erfolgte somit weder ein Wärmeeintrag noch ein Wärmeverlust. Die relevanten Einwirkungen resultierten aus dem Außenklima und aus der nach Süden gerichteten Außenwand mit dem Fenster (Tabelle 7-2). Die Simulationen wurden in vier Simulationsperioden aufgeteilt, in denen an die Jahreszeiten angepasste Bekleidungssets genutzt wurden (Tabelle 7-3).

Tabelle 7-2: U-Werte [ $W/m^2K$ ] der Konstruktionsteile

	U-Wert (horizontal) [ $W/m^2K$ ]
Fenster	1,08
Außenwand	0,39
Innenwände	1,55
Decke	0,33
Boden	0,15

Tabelle 7-3: Bekleidungsfaktor [clo] während der vier Simulationsperioden

Simulationsperiode	Bekleidung [clo]	Aktivitätslevel [met]	Zeitschritte [n]
1. Januar bis 15. März	1,0	1,0	7008
15. März bis 15. Mai	0,7	1,0	5856
15. Mai bis 15. Oktober	0,5	1,0	14688
15. Oktober bis 31. Dezember	1,0	1,0	7488

Tabelle 7-4: Wärme- und Kühlkapazität sowie Heiz- und Kühlsollwerte der unterschiedlichen Gebäuderegler

	BCL00	BCL34
Max. Wärmekapazität [W]	2000	2000
Max. Kühlkapazität [W]	2000	2000
Heizsollwert TL [ $^{\circ}C$ ]	21	18
Kühlsollwert TU [ $^{\circ}C$ ]	24	26

Tabelle 7-4 zeigt sowohl die maximale Heiz- und Kühlkapazität als auch die Heiz- und Kühlsollwerte. Für den adaptiven Regler wurden während der Wintermonate für den (dann nicht relevanten) Kühlsollwert TU höhere Temperaturen und während der Sommermonate für den (dann nicht relevanten) Heizsollwert TL niedrigere Temperaturen zugelassen. Vereinzelt können daher im Winter höhere Raumtemperaturen und im Sommer niedrigere Raumtemperaturen auftreten.

## 7.2 BCL00 / BCL34

Dieser Abschnitt stellt die Simulationsergebnisse des Basisreglers (BCL00), dem adaptiven Kopplungsregler (BCL34) mit adaptiver Sollwertanpassung gegenüber. Bei den Simulationen mit dem Basisregler wurden die vordefinierten und in Gebäuden

üblichen Sollwerttemperaturen gemäß DIN V 18599:10 [138] für den unteren Sollwert (Heizsollwert)  $T_L = 21\text{ °C}$  und für den oberen Sollwert (Kühlsollwert)  $T_U = 24\text{ °C}$  übernommen (Abbildung 7-1). Bei dem adaptiven Regler (BCL34) wurde ein möglichst breiter Bereich von zulässigen Raumtemperaturen zwischen den Anfangssollwerten  $T_{Li} = 18\text{ °C}$  und  $T_{Ui} = 26\text{ °C}$  ausgewählt. Für jede Simulationsperiode werden jeweils die Sollwerte sowie die operativen Temperaturen ( $T_{op}$ ) gezeigt. Im Anschluss wurden die Werte für die globale Behaglichkeit ( $C_o$ ) und der Heizwärme- und Kühlbedarf der zwei Gebäuderegler verglichen.

Ein Vergleich der operativen Temperaturen ( $T_{op}$ ) während der Simulationsperiode vom 1. Januar bis zum 15. März (Abbildung 7-2a) zeigt, dass die Raumtemperaturen durch die Sollwertanpassung des adaptiven Reglers (BCL34) (Abbildung 7-1a) während der ersten Hälfte der Simulation leicht unter denen bei Nutzung des Basisreglers liegen. Die Minimaltemperaturen sinken bis auf eine Temperatur von  $19,5\text{ °C}$  (BCL34). In der zweiten Hälfte liegen die Temperaturen des adaptiven Reglers an wärmeren Tagen über denen des Basisreglers und erreichen Werte von  $27\text{ °C}$ .

Abbildung 7-2b zeigt, dass die operative Temperatur ( $T_{op}$ ), die durch die Sollwertanpassung des adaptiven Reglers reguliert wird (Abbildung 7-1b) während der Simulationsperiode vom 15. März bis zum 15. Mai überwiegend über der des Basisreglers liegt. Die Temperaturen bewegen sich im Bereich von  $19,5\text{ °C}$  bis  $27\text{ °C}$  (BCL34). Vereinzelt fällt die durch den adaptiven Regler regulierte operative Temperatur unter die Werte des Basisreglers.

Abbildung 7-2c zeigt deutlich, dass die operative Temperatur ( $T_{op}$ ) durch die Sollwertanpassung des adaptiven Reglers (Abbildung 7-1c) während der Simulationsperiode vom 15. Mai bis zum 15. Oktober über der Temperatur des Basisreglers liegt. Die Temperaturen durch die Regulation des Basisreglers oszillieren im Bereich zwischen  $21\text{ °C}$  bis  $24\text{ °C}$ , die Temperaturen des adaptiven Reglers im Bereich zwischen  $21,5\text{ °C}$  und  $26\text{ °C}$ . Vereinzelt führt der adaptive Regler zu niedrigeren Temperaturen.

Abbildung 7-2d zeigt die operative Temperatur ( $T_{op}$ ) während der Simulationsperiode vom 15. Oktober bis zum 31. Dezember. Die Sollwerttemperatur des adaptiven Reglers liegt während der meisten Tage unter der des Basisreglers (Abbildung 7-1d) mit Minimalwerten von  $19,5\text{ °C}$  (BCL34) und  $21\text{ °C}$  (BCL00).

*Sollwerttemperatur TU/TL und operative Temperatur  $T_{op}$*

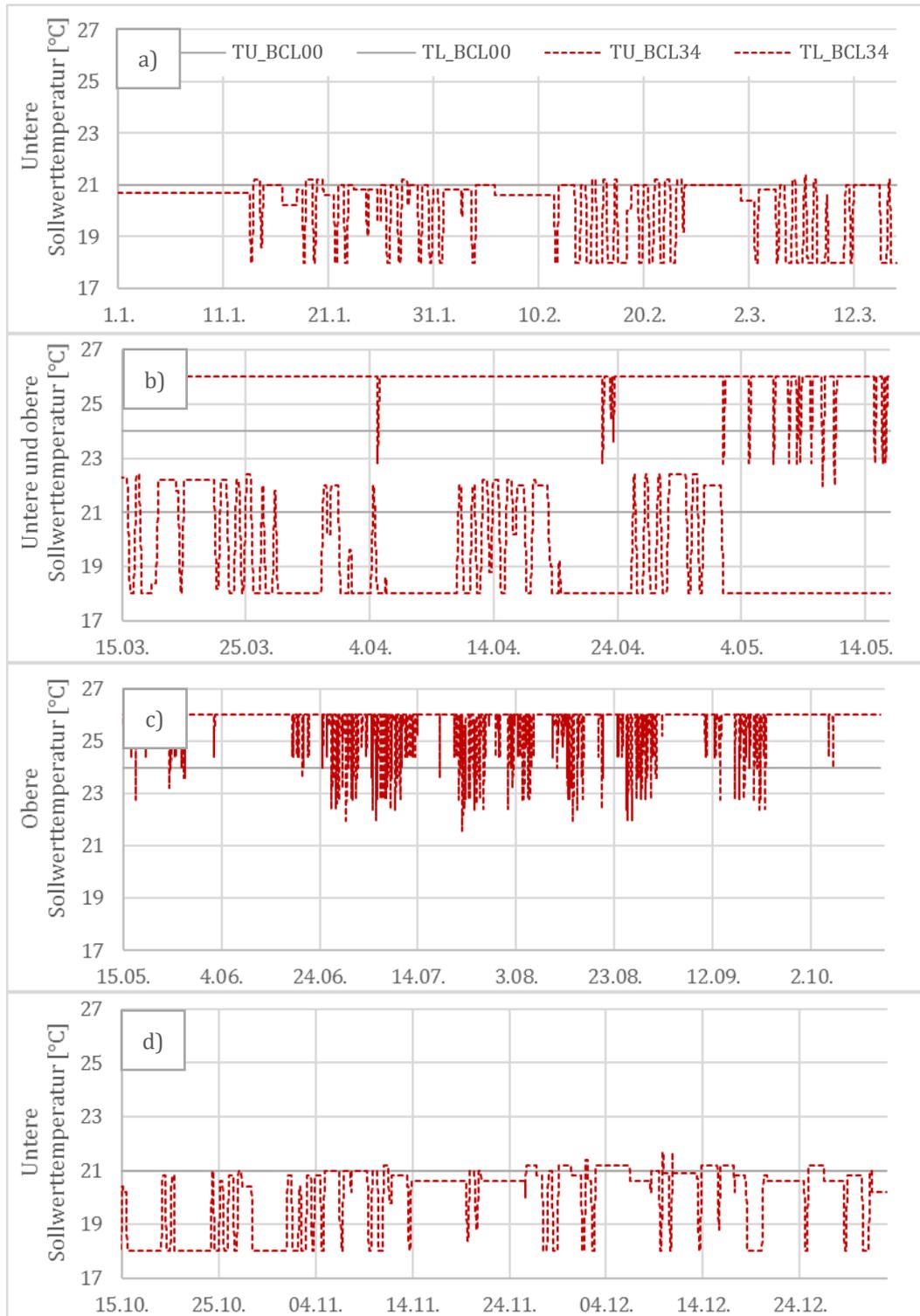


Abbildung 7-1: Heiz- (TL) und Kühlt Sollwert (TU) des Basisreglers (BCL00) und des adaptiven Reglers (BCL34) während der Simulationsperiode vom a) 1. Januar bis 15. März, b) 15. März bis 15. Mai, c) 15. Mai bis 15. Oktober, d) 15. Oktober bis 31. Dezember

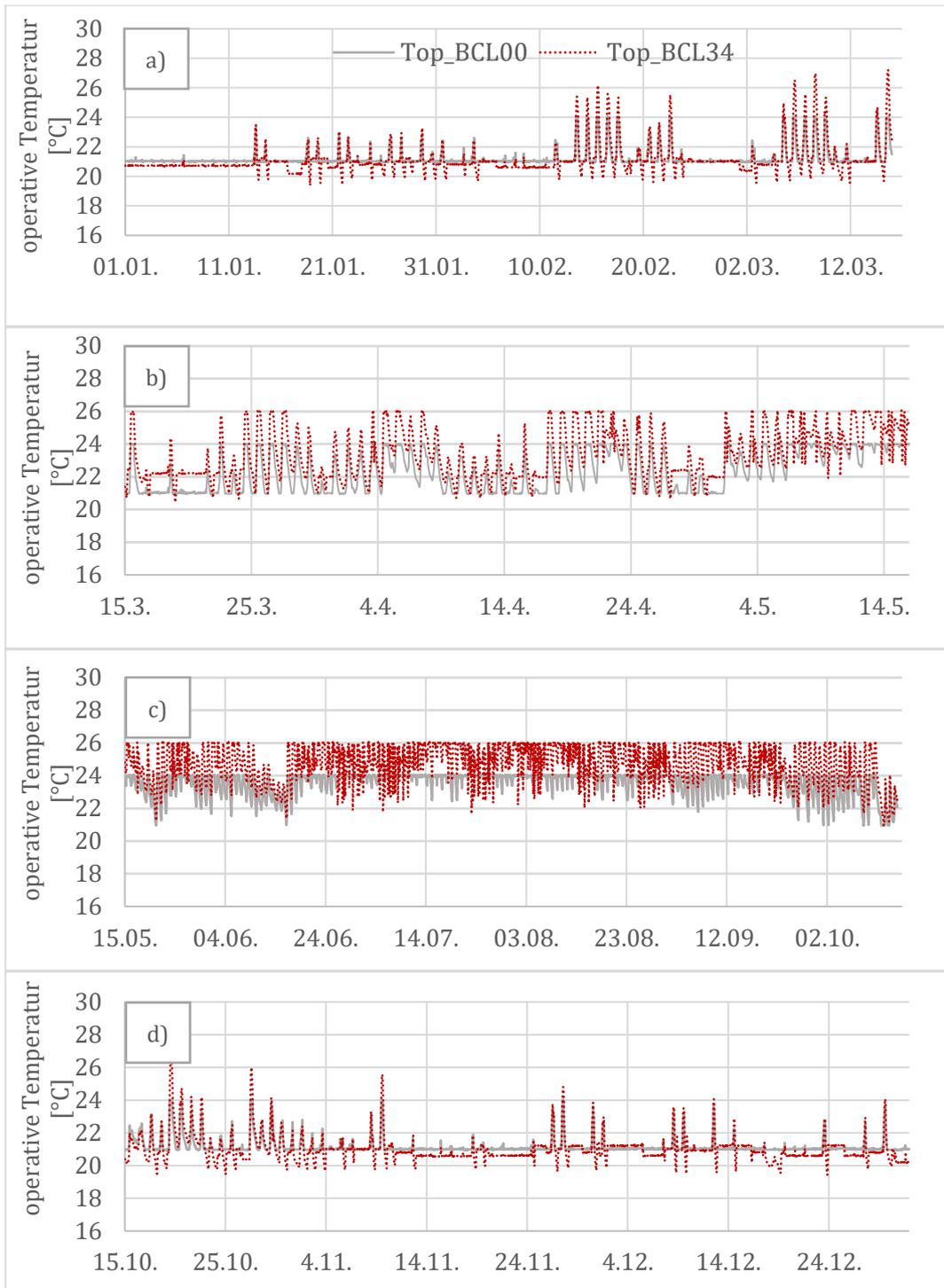


Abbildung 7-2: Operative Temperatur ( $T_{op}$ ) des Basisreglers (BCL00) (grau) und des adaptiven Reglers (BCL34) (rot) während der Simulationsperiode vom a) 01. Januar bis 15. März b) 15. März bis 15. Mai c) 15. Mai bis 15. Oktober d) 15. Oktober bis 31. Dezember

## Globale Behaglichkeit

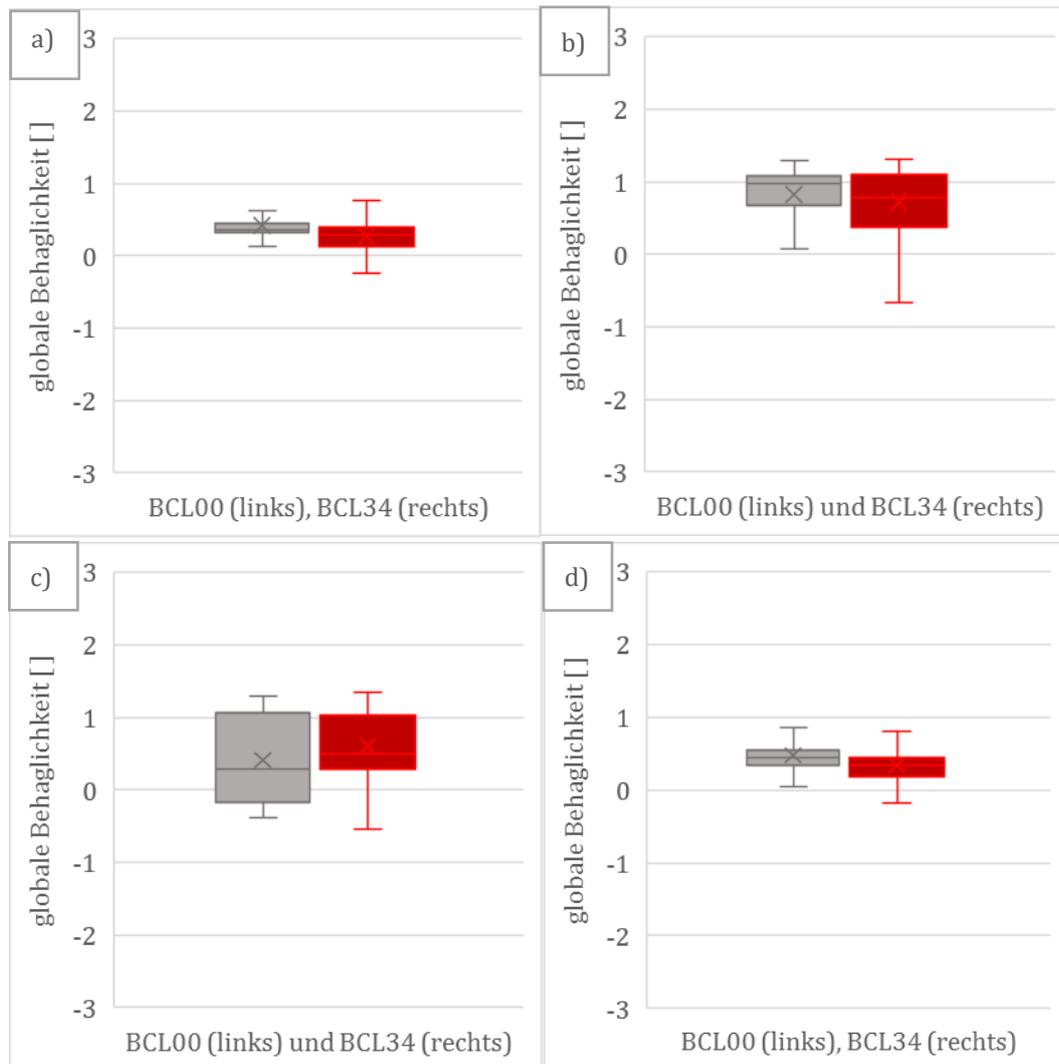


Abbildung 7-3: Globale Behaglichkeit bei Nutzung des Basisreglers (BCL00) und des adaptiven Reglers (BCL34) während der Simulationsperiode vom a) 1. Januar bis zum 15. März, b) 15. März bis zum 15. Mai, c) 15. Mai bis zum 15. Oktober, d) 15. Oktober bis zum 31. Dezember

Abbildung 7-3 zeigt den Vergleich der globalen Behaglichkeit während der vier Simulationsperioden in Form von Boxplot-Diagrammen. Ein Boxplot-Diagramm dient zur Darstellung der grafischen Datenverteilung. Die Box zeigt den Bereich in dem die mittleren 50 % der Daten liegen. Für die Simulationsperiode vom 1. Januar bis zum 15. März (Abbildung 7-3a) liegen die mittleren 50 % der Daten für den Basisregler (BCL00) komprimiert im Behaglichkeitsbereich von 0,3 bis 0,5. Bei dem adaptiven Regler (BCL34) liegen sie im Behaglichkeitsbereich von 0,1 bis 0,4. Der Strich in der Box repräsentiert den Median, der die Daten teilt (je 50 % der Daten liegen unter und oberhalb). Das Kreuz zeigt den Mittelwert der Daten an. Die Antennen (Whisker) stellen den 1,5-fachen Interquartilsabstand dar. Die Ausreißer, die oberhalb des oberen Whiskers und unterhalb des unteren Whiskers liegen, werden zur besseren Lesbarkeit nicht dargestellt. Im Fall des Basisreglers und des adaptiven Reglers reichen die oberen

Antennen für beide bis zu einem Behaglichkeitswert von 1,3. Die unteren Antennen des Basisreglers liegen bei 0,1, die des adaptiven Reglers bei -0,24.

Bei dem Vergleich des Boxplot-Diagramms für die Simulationsperiode vom 15. März bis zum 15. Mai (Abbildung 7-3b) fällt auf, dass der Median des adaptiven Reglers (BCL34) mit einem Behaglichkeitswert von 0,5 leicht höher liegt als der des Basisreglers (BCL00), der einen Wert von 0,4 aufzeigt. Die Maximalwerte liegen im Bereich von 1,2 (BCL00) und 1,3 (BCL34). Die unteren Whisker zeigen Werte im Bereich von -0,4 (BCL00) und -0,5 (BCL34). Der Interquartilsbereich des Basisreglers liegt minimal im negativen Bereich von -0,1 bis 1,0, während er beim adaptiven Regler im positiven Bereich von 0,2 bis 1,0 liegt.

Abbildung 7-3c zeigt die Ergebnisse der Simulationsperiode vom 15. Mai bis zum 15. Oktober. Der Interquartilsbereich von BCL00 ist kleiner als der von BCL34. Die Streuung der Behaglichkeitswerte ist mit dem adaptiven Regler höher als mit dem Basisregler. Beim Basisregler BCL00 liegen 50 % der Daten im Bereich zwischen 0,7 bis 1,1. Der Median liegt bei einem Behaglichkeitswert von 1, während der beim adaptiven Regler (BCL34) bei 0,8 liegt. Der Interquartilsbereich reicht für BCL34 von 0,5 bis 1,1. Für beide Regler liegen die Maximalwerte bei 1,3. Die unteren Whisker reichen bis zu 0,1 (BCL00) und -0,7 (BCL34).

Die Behaglichkeitswerte für die Simulationsperiode vom 15. Oktober bis zum 31. Dezember (Abbildung 7-3d) ähneln den Werten der Simulationsperiode vom 1. Januar bis 15. März. Die positiven Whisker erreichen Werte von 0,9 (BCL00) und 0,8 (BCL34). Die negativen Whisker reichen bis zu den Werten von 0,05 (BCL00) und -0,2 (BCL34). Der Interquartilsbereich für BCL00 liegt zwischen 0,5 bis 0,7. Der für BCL34 zwischen 0,2 bis 0,5. Die beiden Boxen liegen sehr komprimiert im positiven Bereich der Behaglichkeitsskala.

### Heizwärme- und Kühlbedarf

Die folgende Tabelle 7-5 zeigt den Heizwärme- und Kühlbedarf des Basisreglers (BCL00) und des adaptiven Reglers (BCL34). Der Heizwärmebedarf (HWB) eines Gebäudes repräsentiert die Wärmezufuhr, die zur Aufrechterhaltung der gewünschten Raumtemperatur innerhalb der festgelegten Sollwerte (Tabelle 7-4) notwendig ist. Analog dazu repräsentiert der Kühlbedarf (KB) die für die Wärmeabfuhr notwendige Kühlleistung, die zur Aufrechterhaltung der gewünschten Raumtemperaturen notwendig ist.

Der Betrachtungszeitraum „Winter“ setzt sich aus den beiden Simulationsperioden vom 01. Januar bis zum 15. März und vom 15. Oktober bis zum 31. Dezember zusammen. Während der Wintersimulationsperiode liegt der Heizwärmebedarf des adaptiven Reglers (BCL34), zur Bereitstellung der in Abbildung 7-3a und Abbildung 7-3d gezeigten Behaglichkeitswerte, im Vergleich zum Basisregler (BCL00) um 10,4 % niedriger. Der Kühlbedarf ist verhältnismäßig gering und wird bei der Analyse vernachlässigt.

BCL34 zeigt während der Übergangsperiode einen um 1 % geringeren Heizwärmebedarf und einen um 1,5 % höheren Kühlbedarf gegenüber BCL00. Die absoluten Werte zeigen jedoch, dass die Werte für die beiden Regler fast identisch sind.

Für die Sommerperiode ist für den adaptiven Regler eine Reduktion des Kühlbedarfs um 1,7 % gegenüber dem Basisregler festzustellen. Aufgrund des sehr geringen Heizwärmebedarfs während dieser Simulationsperiode wird der Einfluss nicht berücksichtigt.

Im Jahresverlauf liegt der Heizwärmebedarf des adaptiven Reglers (BCL34) im Vergleich zum Basisregler (BCL00) um 9,7 % niedriger. Der Kühlbedarf des adaptiven Reglers liegt um rund 3 % unter dem des Basisreglers (Tabelle 7-5).

*Tabelle 7-5: Heizwärme- (HWB) und Kühlbedarf (KB) des Basisreglers (BCL00) und des adaptiven Reglers (BCL34) während der Betrachtungszeiträume für Winter a) und d), Übergang b), Sommer c) und für ein Jahr, \*Reduktion gegenüber BCL00*

Vergleich BCL00 und BCL34								
Betrachtungs- zeitraum	Winter [a), d)]		Übergang [b)]		Sommer [c)]		Jahr	
Gebäuderegler	BCL00	BCL34	BCL00	BCL34	BCL00	BCL34	BCL00	BCL34
HWB [kWh/m <sup>2</sup> ]	54	48	5	5	0	0	60	54
KB [kWh/m <sup>2</sup> ]	1	0	7	7	43	43	51	49
Reduktion HWB* (kWh/m <sup>2</sup> )	10.4% (5.60)		1.0% (0.05)		--		9.7% (5.78)	
Reduktion KB* (kWh/m <sup>2</sup> )	--		-1.5% -(0.10)		1.7% (0.74)		3.0% (1.54)	

### Zusammenfassung

Die Reduzierung des Heizwärmebedarfs während der Wintermonate war möglich, da der adaptive Regler (BCL34) im Vergleich zum Basisregler (BCL00) niedrigere Raumtemperaturen ( $T_{op}$ ) erlaubt (Abbildung 7-2a,d). Werden die Sollwerte nicht adaptiert, kann  $T_{op}$  bis zu 27 °C ansteigen. Bei Verwendung des Basisreglers steigen die Temperaturen maximal bis zum oberen Sollwert von 24 °C an.

Obwohl die Behaglichkeitswerte überwiegend im positiven Bereich liegen, zeigt der Basisregler durch den höher liegenden Interquartilsbereich, insgesamt höhere Behaglichkeitswerte (Abbildung 7-3a,d). Um eine Übersicht über die Anzahl der negativen Behaglichkeitswerte zu bekommen, wurden im Anhang C die Behaglichkeitswerte anhand von Histogrammen einander gegenübergestellt. Bei der Auswertung der Histogramme für die beiden Wintersimulationsperioden fällt auf, dass der adaptive Regler (BCL34) wenig negative Werte vorweist. Der größere Anteil der Behaglichkeitswerte liegt im positiven Bereich. Dies erklärt sich am ehesten aus dem Einfluss der Regelungslogik, die erst anspringt, wenn ein negativer Behaglichkeitswert (<0) registriert wird. Die Anzahl dieser negativen Werte könnte vermindert werden, wenn der Bereich der Behaglichkeitssollwerte zur Aktivierung der unteren und oberen Sollwertadaptation (für die zentrale Anlage) vergrößert würde (siehe hierzu Abbildung 6-5). Eine Anpassung könnte beispielsweise bereits dann erfolgen, wenn die globale

Behaglichkeit einen Wert kleiner 0,5 erreicht, verglichen mit dem aktuellen Wert kleiner null. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass während der Wintersimulationsperiode mit dem adaptiven Regler bei einer geringen Anzahl von negativen Behaglichkeitswerten viele positive Behaglichkeitswerte und eine Reduzierung des Heizwärmebedarfs von rund 10 % erreicht werden können.

Während der Übergangszeit vom 15. März bis zum 15. Mai ist erkennbar, dass die Innenraumbedingungen ( $T_{op}$ ) in hohem Maße durch die Solarstrahlung beeinflusst wird (Anhang Abbildung 10-9). Die wechselnden Innenraumbedingungen, bedingt durch das Außenklima, führen zu einem höheren Kühlbedarf während dieser Simulationsperiode. Hier hat die Sollwertadaption einen negativen Effekt auf die Reduktion des Kühlbedarfs gegenüber dem Basisregler. Die globale Behaglichkeit kann durch den adaptiven Regler (BCL34) gesteigert werden (Abbildung 7-3b). Gleichzeitig kann eine Reduktion des Heizwärmebedarfs um rund 1 % beobachtet werden, allerdings auch eine, wenn auch minimale, Steigerung des Kühlbedarfs um 1,5 %. Dies zeigt, dass die zentrale Anlage im Kühlbereich „zu viel“ interveniert hat. Die Häufigkeitsverteilung (siehe Histogramme Anhang C) zeigt mit dem adaptiven Regler eine Zunahme der Behaglichkeitswerte im Bereich von 0 bis 1,4. Zwar nehmen die Werte im Vergleich zum Basisregler im Bereich von 1,0 bis 1,2 ab, aber insgesamt steigen die Werte im Bereich von 0 bis 1,4 an.

Während der Sommerperiode ist die Einsparung des Kühlbedarfs für den adaptiven Regler gering. Durch das häufige Herunterkühlen auf eine behagliche Temperatur und Zurückspringen auf eine höhere Sollwerttemperatur bei behaglichen Zuständen wird ein größerer Kühlbedarf notwendig. Hier hat das lokale (warme) Empfinden des Kopfs zu einer Verminderung der globalen Behaglichkeit geführt (Abbildung 7-3c). Die Häufigkeitsverteilung (Histogramme Anhang C) zeigt eine Zunahme der Werte im Bereich zwischen 0 bis 1,0 für BCL34, dagegen zeigt BCL00 vermehrt Werte im Bereich von -0,4 bis 0 und 1 bis 1,2.

Im Jahresverlauf kann der adaptive Regler mit den variablen Sollwerten im Bereich von 18 °C bis 26 °C ein überwiegend positives Behaglichkeitslevel gegenüber dem Basisregler mit dessen fixierten Sollwerten von 21 °C und 24 °C vorweisen. Insbesondere während der Wintermonate zeigt der adaptive Regler gegenüber dem Basisregler im Bereich der Reduktion des Heizwärmebedarfs positive Ergebnisse. Die Behaglichkeitswerte sind bei Anwendung beider Systeme mehrheitlich gleich. Um eine Steigerung der Behaglichkeit zu erreichen, werden daher im nächsten Schritt dezentrale Heiz- und Kühlsysteme dem adaptiven Regler hinzugefügt.

### 7.3 BCL34 / BCL34\_ThW

Dieser Abschnitt vergleicht die Werte des adaptiven Gebäudereglers (BCL34) mit denen der Variante mit thermoelektrischer Heiz- und Kühlwand (BCL34\_ThW), nachfolgend auch Variante (BCL34\_\*) genannt. Es werden die Ergebnisse der vier Simulationsperioden dargestellt.

Für jede Simulationsperiode werden die Adaption der Sollwerttemperaturen (TU, TL), die daraus resultierenden operativen Temperaturen ( $T_{op}$ ), die globalen Behaglichkeitswerte ( $C_o$ ) sowie der Heizwärme (HWB)- und Kühlbedarf (KB) der Gebäuderegler gezeigt.

Abbildung 7-4a zeigt die Adaption des unteren Sollwertes TL (Heizsollwert) des adaptiven Reglers (BCL34) und der Variante mit thermoelektrischer Stellwand (BCL34\_\*) während der ersten Simulationsperiode vom 15. Januar bis zum 15. März. Der Sollwert (BCL34\_\*) liegt an Tagen an denen er adaptiert wird, deutlich unter dem Sollwert des adaptiven Reglers (BCL34). Meist liegt er um 0,5 K niedriger im Vergleich zu BCL00. Für die Variante (BCL34\_\*) erfolgt die Sollwertadaption im Bereich zwischen 18 °C bis 20,6 °C. In Folge liegt eine niedrigere operative Temperatur im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34) (Abbildung 7-5a) vor.

Abbildung 7-4b zeigt die Adaption der unteren Sollwerttemperaturen TL der beiden Regler während der Simulationsperiode vom 15. März bis zum 15. Mai. Diese liegt für die Variante (BCL34\_\*) meistens unter der des adaptiven Reglers (BCL34) im Bereich von 18 °C bis 22 °C. Es liegen auch Tage vor, an denen die Variante (BCL34\_\*) im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34) zu niedrigeren Sollwerten führt (beispielsweise am 20. Juni, siehe Pfeile im Diagramm). Während dieser Simulationsperiode liegen die Raumtemperaturen der Variante (BCL34\_\*) zu Beginn der Simulation minimal unter denen des adaptiven Reglers (Abbildung 7-5b). Gegen Ende der Simulationsperiode lässt die Variante mit Stellwand höhere Temperaturen zu als der adaptive Regler.

Während der Simulationsperiode vom 15. Mai bis zum 15. Oktober ist der obere Sollwert TU (Kühlsollwert) relevant (Abbildung 7-4c). Die Variante mit thermoelektrischer Stellwand kann an einigen Tagen höhere Sollwerte zulassen als der adaptive Regler. Beispielsweise liegt der obere Sollwert des adaptiven Reglers am 2. Juni bei 24,4 °C, während die Variante einen Sollwert von 26 °C reguliert. Durch die höheren Sollwerte liegen auch die operativen Temperaturen der Variante BCL34\_\* an vielen Tagen minimal über denen des adaptiven Reglers (BCL34) (Abbildung 7-5c).

Während der letzten Simulationsperiode vom 15. Oktober bis zum 31. Dezember ist der untere Sollwert TL (Heizsollwert) relevant (Abbildung 7-4d). Die Variante (BCL34\_\*) kann den Sollwert auf einer niedrigeren Temperatur halten als der adaptive Regler (BCL34). Die operativen Temperaturen der Variante (BCL34\_\*) sind entsprechend niedriger als die des adaptiven Reglers (BCL34) (Abbildung 7-5d).

*Sollwerttemperatur  $T_U/TL$  und operative Temperatur  $T_{op}$*

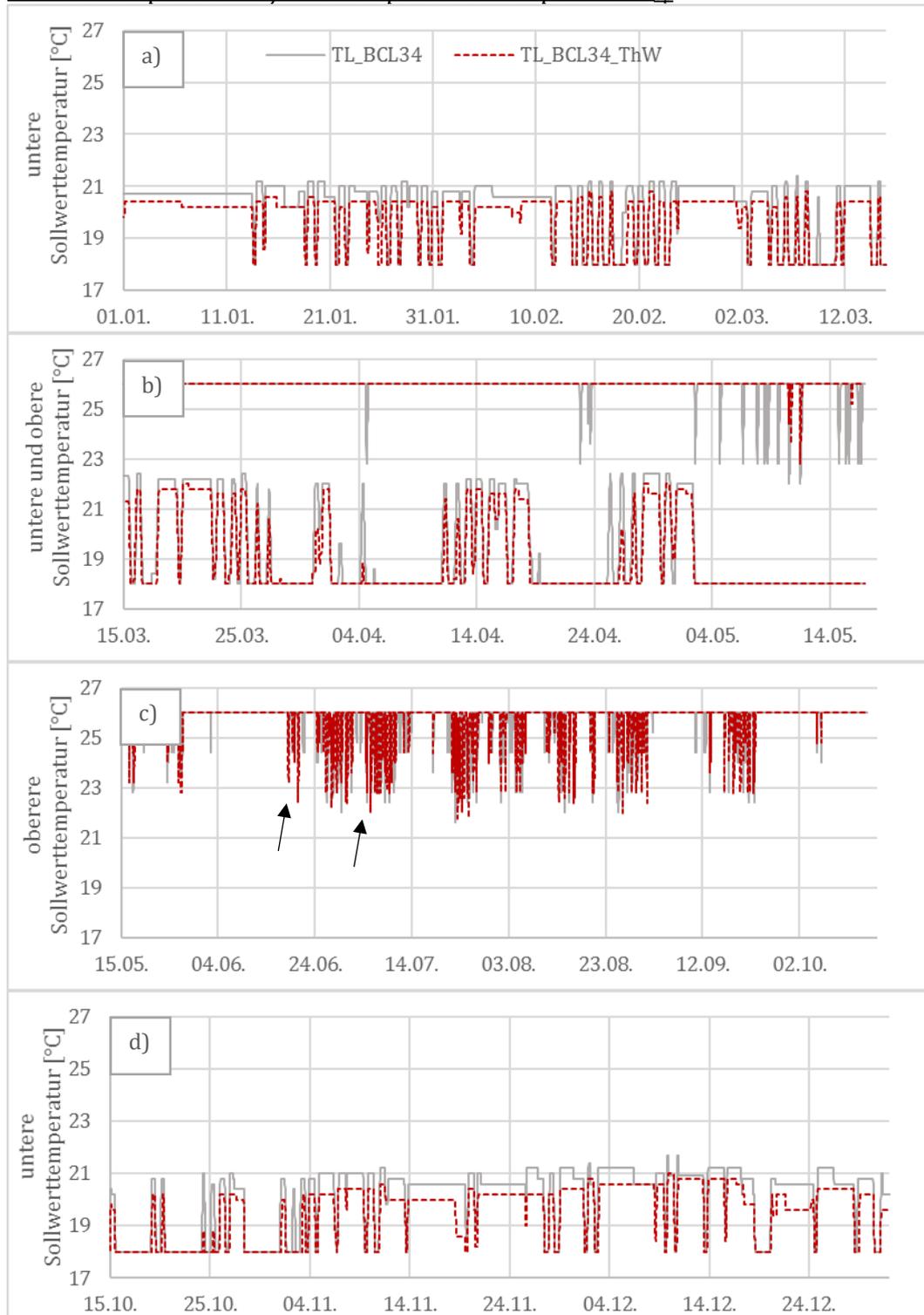


Abbildung 7-4: Heiz- (TL) und Kühlsollwert (TU) des adaptiven Reglers (BCL34) und der Variante mit thermoelektrischer Heiz- und Kühlwand (BCL34\_ThW) während der Simulationsperiode vom a) 1. Januar bis 15. März, b) 15. März bis 15. Mai, c) 15. Mai bis 15. Oktober, d) 15. Oktober bis 31. Dezember

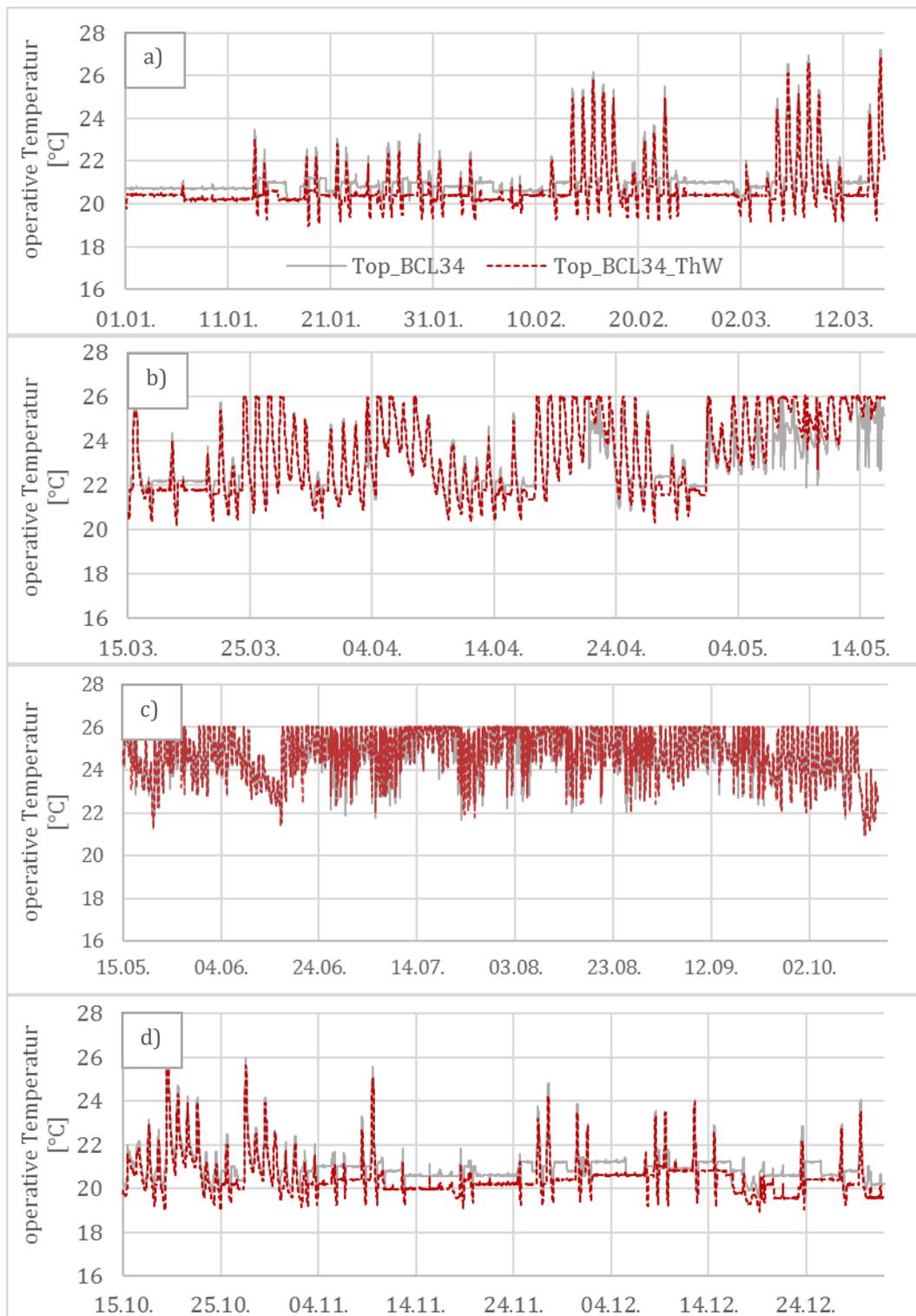


Abbildung 7-5: Operative Temperatur ( $T_{op}$ ) des adaptiven Gebäudereglers (BCL34) und der Variante mit thermoelektrischer Heiz- und Kühlwand (BCL34\_ThW) während der Simulationsperiode vom a) 1. Januar bis 15. März, b) 15. März bis 15. Mai, c) 15. Mai bis zum 15. Oktober, d) 15. Oktober bis 31. Dezember

## Globale Behaglichkeit

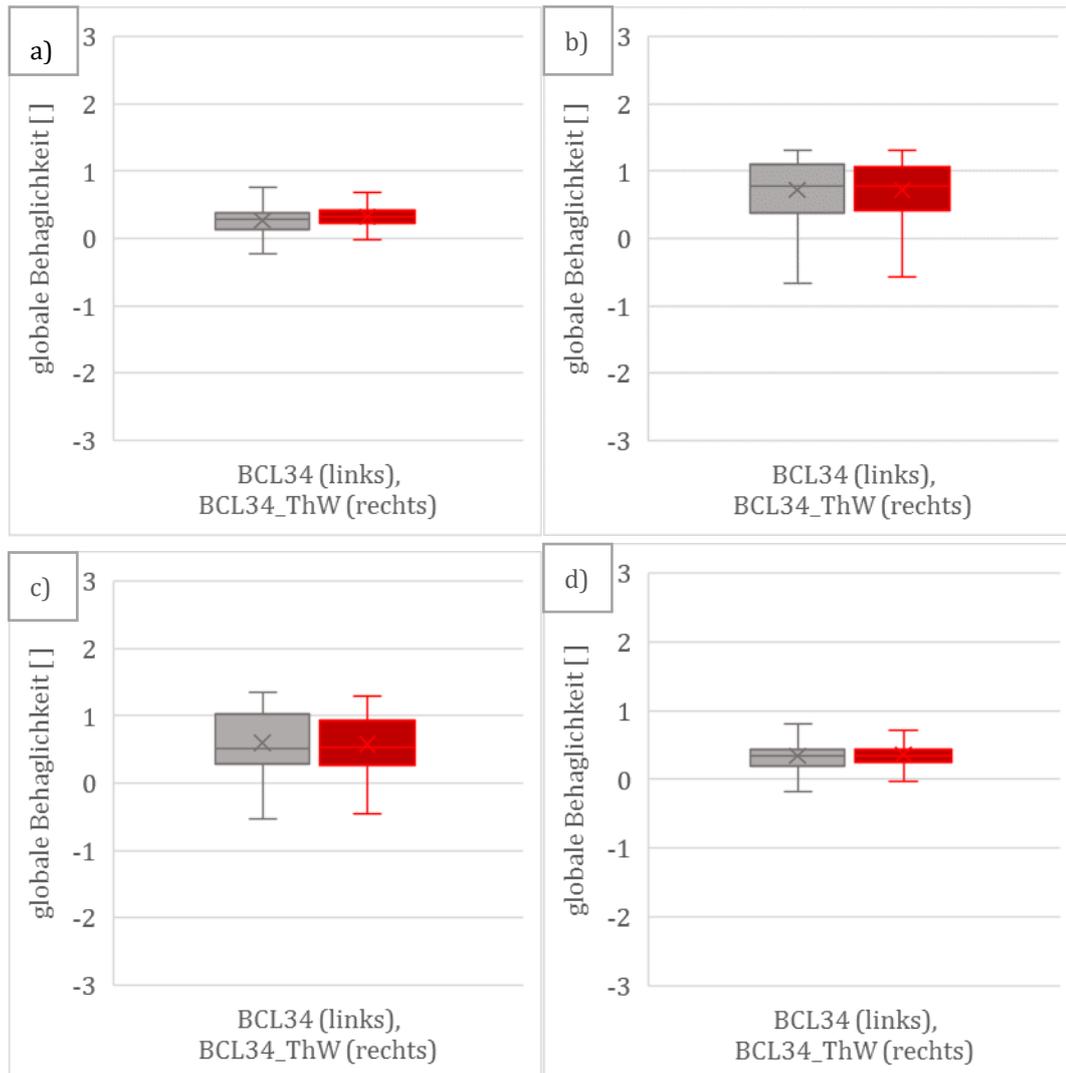


Abbildung 7-6: Globale Behaglichkeit des adaptiven Reglers (BCL34) und der Variante mit der thermoelektrischen Stellwand (BCL34\_ThW) während der Simulationsperiode von a) 1. Januar bis 15. März, b) 15. März bis 15. Mai, c) 15. Mai bis 15. Oktober, d) 15. Oktober bis 31. Dezember

Abbildung 7-6a zeigt die Behaglichkeitswerte des adaptiven Reglers (BCL34) und der Variante mit der thermoelektrischen Stellwand (BCL34\_\*) anhand eines Boxplot-Diagramms für die Simulationsperiode vom 1. Januar bis zum 15. März. Die Werte für die Behaglichkeit sind in beiden Fällen relativ gleich. Die Mediane liegen im positiven Bereich bei 0,29 (BCL34) und 0,31 (BCL34\_\*) auf der Behaglichkeitsskala (Abbildung 7-6a). Die Behaglichkeitswerte können mithilfe der Variante (BCL34\_\*) insgesamt in Richtung des positiven Bereichs verschoben werden. Das zeigt auch die Häufigkeitsverteilung anhand der Histogramme (BCL34/BCL34\_ThW) im Anhang C. Es erfolgt im Vergleich zum adaptiven Regler eine Steigerung der Werte im Bereich von 0 bis 0,2 zu 0,2 bis 0,6 für die Variante (BCL34\_\*). Die Variante zeigt weniger negative Werte als der adaptive Regler.

Beim Vergleich der globalen Behaglichkeit für die Simulationsperiode vom 15. März bis zum 15. Mai (Abbildung 7-6b) fällt auf, dass die beiden Gebäuderegler sehr ähnliche Werte zeigen. Die unteren Whisker liegen im Bereich von -0,5 (BCL34) und -0,4 (BCL34). Die Maximalwerte liegen bei 1,3 und die Mediane bei 0,5. Der Gebäuderegler mit der thermoelektrischen Stellwand (BCL34\_\*) begünstigt die Zunahme der Werte im Behaglichkeitsbereich von 1,0 bis 1,4 im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34) (Anhang C ). Im Vergleich zu BCL34 zeigt die Variante BCL34\_\* auch eine Zunahme der Werte im Bereich von 0,2 bis 0,4. Bei BCL34 überwiegen dagegen die Werte zwischen 0,2 bis 1,0.

Die Regelungslogik hält die Sollwerte TU, TL dann konstant, wenn die Behaglichkeitswerte im Bereich von 0 bis 0,5 liegen. Dies könnte eine Zunahme der Behaglichkeitswerte im Bereich von 0 bis 0,4 durch die Einwirkung der thermoelektrischen Stellwand erklären.

Abbildung 7-6c vergleicht die thermische Behaglichkeit durch Nutzung des adaptiven Gebäudereglers (BCL34) gegenüber der Nutzung der Variante (BCL34\_\*) während der Simulationsperiode vom 15. Mai bis zum 15. Oktober. Die Mediane der Behaglichkeitswerte liegen für beide Regler bei 0,8. Die Interquartilsbereiche der beiden Regler liegen zwischen 0,5 bis 1,1 mit Maximalwerten bei 1,2. Der untere Whisker der Variante (BCL34\_\*) liegt bei -0,6, der des adaptiven Reglers (BCL34) bei -0,7. Die Behaglichkeitswerte der Variante mit thermoelektrischer Stellwand (BCL34\_\*) gleichen denen des adaptiven Reglers (BCL34) und führen zu einer Zunahme im Behaglichkeitsbereich von 0,6 bis 0,8 (Anhang C ). Die Werte sind gleichmäßig über den Behaglichkeitsbereich von 0 bis 1,4 verteilt. Durch die öfter vorkommenden höheren Raumtemperaturen entsteht eine Unbehaglichkeit, die die thermoelektrische Stellwand nicht allein ausgleichen kann.

In Abbildung 7-6d für die Simulationsperiode vom 15. Oktober bis zum 31. Dezember kann die globale Behaglichkeit mit der Variante (BCL34\_\*) minimal gesteigert werden. Der untere Whisker ist gegenüber dem adaptiven Regler (BCL34) leicht höher. Eine Steigerung der Behaglichkeitswerte erfolgte für die Variante (BCL34\_\*) im Bereich von 0,2 bis 0,4 im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34) (Anhang C ).

### Heizwärme- und Kühlbedarf

Tabelle 7-6 zeigt den Heizwärme- (HWB) und Kühlbedarf (KB) des adaptiven Reglers (BCL34) und der Variante mit thermoelektrischer Heiz- und Kühlwand (BCL34\_\*) für die vier Betrachtungszeiträume von Winter, Übergangszeit, Sommer und für ein Jahr. Der Betrachtungszeitraum „Winter“ setzt sich aus den beiden Wintersimulationsperioden vom 01. Januar bis zum 15. März und vom 15. Oktober bis zum 31. Dezember zusammen.

Zusätzlich erfolgt in Tabelle 7-7 ein Vergleich zwischen der Variante (BCL34\_\*) mit thermoelektrischer Heiz- und Kühlwand mit dem Basisregler (BCL00) aus Kapitel 7.2 für die vier Betrachtungszeiträume. Die elektrische Leistung der thermischen Heiz- und Kühlwand beträgt im Kühlfall 16 Watt und im Heizfall 12 Watt pro Zone (siehe Kapitel 6.3). Der Stromverbrauch bezieht sich auf einen prototypischen Raum mit 15 m<sup>2</sup> Fläche.

Tabelle 7-6: Heizwärme- (HWB) und Kühlbedarf (KB) des adaptiven Reglers (BCL34) und der Variante mit thermoelektrischer Heiz- und Kühlwand (BCL34\_ThW) eines Büros mit 15 m<sup>2</sup> Fläche, Stromverbrauch der thermoelektrischen Stellwand ThW, \*Reduktion gegenüber BCL34

Vergleich BCL34 und BCL34_ThW								
Betrachtungszeitraum	Winter [a,d]]		Übergang [b]]		Sommer [c]]		Jahr	
Gebäuderegler	BCL34	BCL34_ThW	BCL34	BCL34_ThW	BCL34	BCL34_ThW	BCL34	BCL34_ThW
HWB [kWh/m <sup>2</sup> ]	48	45	5	5	0	0	54	50
KB [kWh/m <sup>2</sup> ]	0	0	7	6	43	42	49	48
Reduktion HWB* (kWh/m <sup>2</sup> )	7.2% (3.5)		13.2% (0.7)		--		7.8% (4.2)	
Reduktion KB* (kWh/m <sup>2</sup> )	--		16.4% (1.1)		1.4% (0.6)		3.5% (1.7)	
Stromverbrauch ThW [kWh <sub>el</sub> ]	--	117	--	30	--	28	--	175
Stromverbrauch ThW [kWh <sub>el</sub> /m <sup>2</sup> ]	--	8	--	2	--	2	--	12

Tabelle 7-7: Heizwärme- (HWB) und Kühlbedarf (KB) des Basisreglers (BCL00) und der Variante mit thermoelektrischer Heiz- und Kühlwand (BCL34\_ThW) eines Büros mit 15 m<sup>2</sup> Fläche, Stromverbrauch der thermoelektrischen Stellwand ThW, \*Reduktion gegenüber BCL00

Vergleich BCL00 und BCL34_ThW								
Betrachtungszeitraum	Winter [a,d]]		Übergang [b]]		Sommer [c]]		Jahr	
Gebäuderegler	BCL00	BCL34_ThW	BCL00	BCL34_ThW	BCL00	BCL34_ThW	BCL00	BCL34_ThW
HWB [kWh/m <sup>2</sup> ]	54	45	5	5	0	0	60	50
KB [kWh/m <sup>2</sup> ]	1	0	7	6	43	42	51	48
Reduktion HWB* (kWh/m <sup>2</sup> )	16.8% (9.10)		14.1% (0.76)		--		16.7% (9.97)	
Reduktion KB* (kWh/m <sup>2</sup> )	--		15.1% (0.98)		3.1% (1.33)		6.4% (3.25)	
Stromverbrauch ThW [kWh <sub>el</sub> ]	--	117	--	30	--	28	--	175
Stromverbrauch ThW [kWh <sub>el</sub> /m <sup>2</sup> ]	--	8	--	2	--	2	--	12

Während des Winter-Betrachtungszeitraums zeigt der Basisregler (BCL00) den höchsten Heizwärmebedarf (Tabelle 7-7) im Vergleich zur Variante mit thermoelektrischer Heiz- und Kühlwand (BCL34\_\*). Die Variante hat einen um 16,8 % niedrigeren Heizwärmebedarf gegenüber dem Basisregler (BCL00) (Tabelle 7-7) und einen um 7,2 % niedrigeren Heizwärmebedarf gegenüber dem adaptiven Regler (BCL34) (Tabelle 7-6). Der Kühlbedarf ist während der Winterperiode verhältnismäßig gering und kann vernachlässigt werden.

Die Variante (BCL34\_\*) hat während der Übergangszeit im Vergleich zum Basisregler (BCL00) einen um rund 14 % (Tabelle 7-7) und im Vergleich zum adaptiven

Regler (BCL34) einen um rund 13,2 % geringeren Heizwärmebedarf (Tabelle 7-6). Der Kühlbedarf kann mit der Variante (BCL34\_\*) um 15,1 % (Tabelle 7-7) gegenüber BCL00 und im Vergleich zu BCL34 um 16,4 % gesenkt werden (Tabelle 7-6).

Während der Sommerperiode vom 15. Mai bis zum 15. Oktober zeigt die Variante (BCL34\_\*) einen um 3 % geringeren Kühlbedarf gegenüber dem Basisregler (BCL00) (Tabelle 7-7) und um 1,4 % geringeren Bedarf gegenüber dem adaptiven Regler (BCL34) (Tabelle 7-6). Der Anteil des Heizwärmebedarfs ist während der Sommermonate verhältnismäßig gering und wird nicht weiter beachtet.

Im Jahresverlauf kann die Variante (BCL34\_\*) den Heizwärmebedarf im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34) um 7,8 % (Tabelle 7-6) und zum Basisregler (BCL00) um 16,7 % reduzieren (Tabelle 7-7). BCL34\_\* reduziert den Kühlbedarf um 3,5 % gegenüber BCL34 (Tabelle 7-6) und um 6,4 % gegenüber BCL00 (Tabelle 7-7).

### Zusammenfassung

Der Basisgebäuderegler (BCL00) zeigt zur Einhaltung der Sollwerttemperaturen im Jahresverlauf einen größeren Heizwärme- und Kühlbedarf als die Variante des adaptiven Reglers mit thermoelektrischer Stellwand (BCL34\_\*). Die Variante (BCL34\_\*) kann in allen Fällen den Heizwärme- und Kühlbedarf gegenüber dem adaptiven Regler (BCL34) senken und gleichzeitig die Behaglichkeit gegenüber dem adaptiven Regler steigern. Eine Steigerung erfolgt vor allem im Bereich der Minimalwerte.

Der Minimalwert der Behaglichkeitswerte mit der Variante (BCL34\_\*) liegt in allen Simulationsergebnissen über dem Minimalwert des adaptiven Reglers (BCL34). Die Maximalwerte liegen meist auf demselben Niveau. Dies wird durch die Regelungslogik innerhalb des adaptiven Reglers ausgelöst, der bei einem Behaglichkeitswert zwischen 0,5 bis 1,5 die Sollwerte innerhalb der „Smoothing“-Bedingungen langsam in Richtung Anfangssollwerte zurücksetzt.

Hier muss erwähnt werden, dass sich der Fokus hauptsächlich auf den Heizwärme- und Kühlbedarf der zentralen Heiz- und Kühlanlage bezieht, da die thermoelektrische Stellwand nur in der Regelungslogik und nicht als eigenständiges Heiz- und Kühlsystem innerhalb der Heiz- und Kühlanlagen implementiert wurde. Eine Berechnung des Strombedarfs wurde dennoch durchgeführt und separat aufgezeigt (Tabelle 7-6). Die Berücksichtigung der Endenergie für die zentrale Anlage sowie für die dezentralen Systeme erfolgt in Kapitel 8.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich die Hinzunahme der thermoelektrischen Stellwand innerhalb der Regelungslogik des adaptiven Reglers positiv auf die Behaglichkeit und die Reduktion des Heizwärme- und Kühlbedarfs auswirkt. Die thermische Behaglichkeit des Manikin kann gesteigert werden. Vordergründig ist zwar nur die Steigerung der Minimalwerte zu sehen, doch die gezeigte Reduktion des Heizwärme- und Kühlbedarfs ist darauf zurückzuführen, dass viel öfter behagliche Zustände vorgelegen haben, die sich auf die Sollwertadaptionen ausgewirkt haben. Die Sollwerte werden bei höheren Behaglichkeitswerten entweder auf demselben Niveau

gehalten oder langsam zu den Anfangssollwerten zurückgeführt. Dadurch wird der Heizwärme- und Kühlbedarf reduziert.

Auch zeigt die Auswertung der Histogramme (Anhang C ) innerhalb des Behaglichkeitsbereichs von -2 bis +2 eine Verschiebung der Behaglichkeitswerte bei Hinzunahme des dezentralen Systems (BCL34\_\*). Somit sind die beiden Grundgedanken, dass es durch die Anwendung der Variante des adaptiven Reglers mit thermoelektrischer Heiz- und Kühlwand zu gesteigerter Behaglichkeit und energieeffizienter Sollwertadaption kommt, erfüllt.

#### 7.4 BCL34 / BCL34\_Stuhl

In diesem Abschnitt werden die Simulationsergebnisse des adaptiven Gebäudereglers (BCL34) den Ergebnissen des Reglers mit Bürostuhls mit Heiz- und Kühlfunktion (BCL34\_Stuhl), nachfolgend auch Variante (BCL34\_\*) genannt, gegenübergestellt.

Während der Simulationsperiode vom 1. Januar bis zum 15. März (Abbildung 7-7a) erlaubt die Variante mit Stuhl (BCL34\_\*) niedrigere Heizsollwerte und niedrigere operative Temperaturen gegenüber dem adaptiven Gebäuderegler (BCL34) (Abbildung 7-8a).

Abbildung 7-7b zeigt die Adaption der unteren und oberen Sollwerte des adaptiven Gebäudereglers (BCL34) und der Variante (BCL34\_\*) während der Simulationsperiode vom 15. März bis zum 15. Mai. Die Variante (BCL34\_\*) regelt häufig auf höhere obere Sollwerttemperaturen (TU) im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34). Bei der Sollwertadaption der unteren Sollwerte (TL) lässt die Variante (BCL34\_\*) öfter niedrigere Sollwerte zu als der adaptive Regler (BCL34), reguliert den unteren Sollwert aber in Einzelfällen auch gelegentlich höher als dieser. Die operativen Temperaturen der beiden Gebäuderegler zeigen ähnliche Werte (Abbildung 7-8b). Gegen Simulationsende liegen die Temperaturen der Variante (BCL34\_\*) über denen des adaptiven Reglers (BCL34).

Während der Simulationsperiode vom 15. Mai bis zum 15. Oktober lässt die Variante mit Stuhl (BCL34\_\*) höhere Sollwerttemperaturen in den Sommermonaten zu (Abbildung 7-7c). Dadurch zeigen sich mit der Variante (BCL34\_\*) höhere operative Temperaturen im Vergleich zum adaptiven Gebäuderegler (BCL34). In beiden Fällen reichen die Temperaturen von 21,5 °C bis 26 °C (Abbildung 7-8c).

Die Simulationsperiode vom 15. Oktober bis zum 31. Dezember zeigt, dass die untere Sollwerttemperatur TL (Heizsollwert) der Variante mit Bürostuhl (BCL34\_\*) oft unter der des adaptiven Reglers (BCL34) (Abbildung 7-7d) liegt. Dies hat auch einen Einfluss auf die operative Temperatur. Die Variante zeigt vor allem gegen Ende im Vergleich zum adaptiven Regler niedrigere Temperaturen (Abbildung 7-8d).

Sollwerttemperatur  $T_U/TL$  und operative Temperatur  $T_{op}$

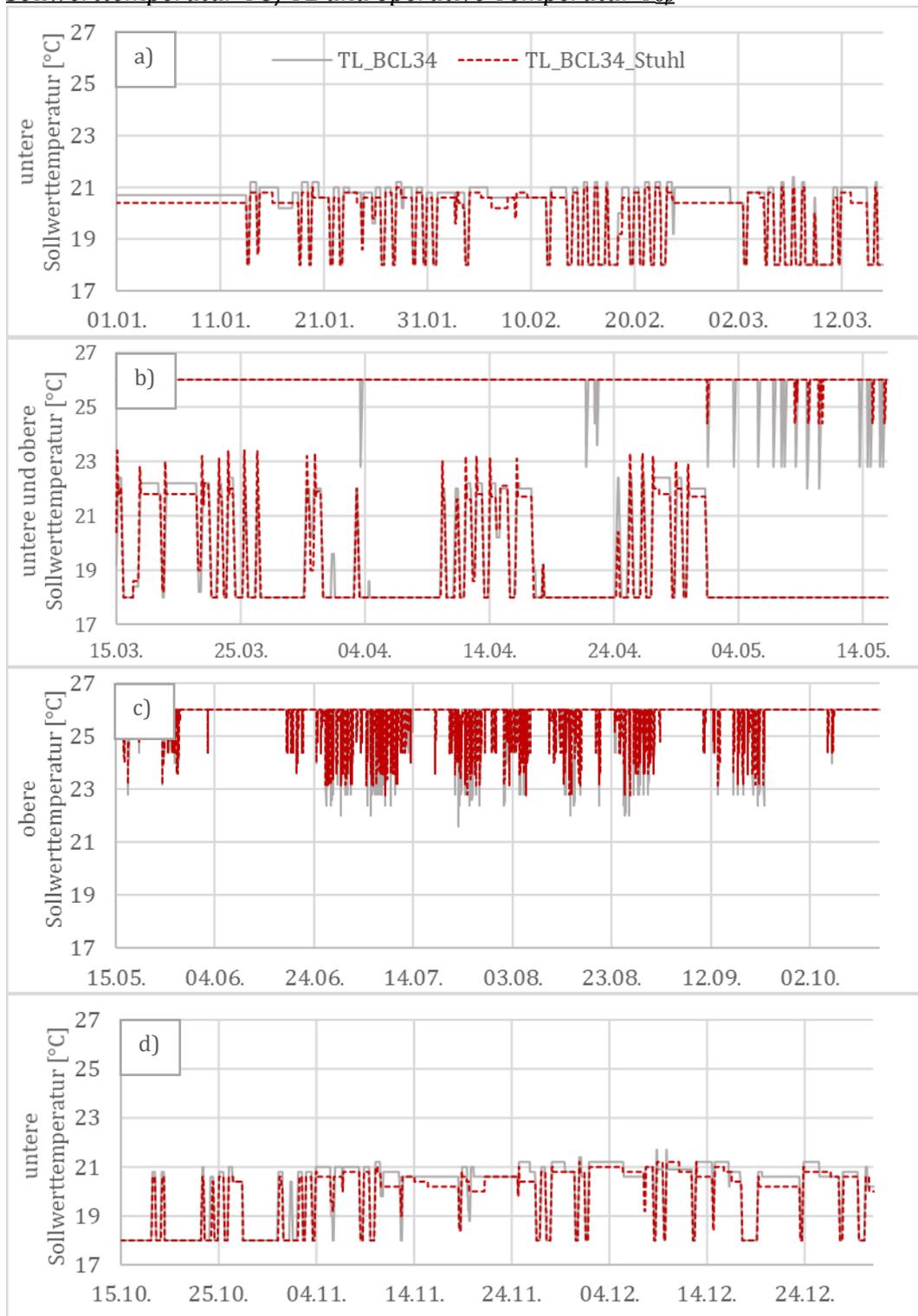


Abbildung 7-7: Heiz- (TL) und Kühltollwert (TU) des adaptiven Reglers (BCL34) und der Variante mit Bürostuhl (BCL34\_Stuhl) während der Simulationsperiode vom a) 1. Januar bis 15. März, b) 15. März bis 15. Mai, c) 15. Mai bis 15. Oktober, d) 15. Oktober bis 31. Dezember

### Operative Temperatur $T_{op}$

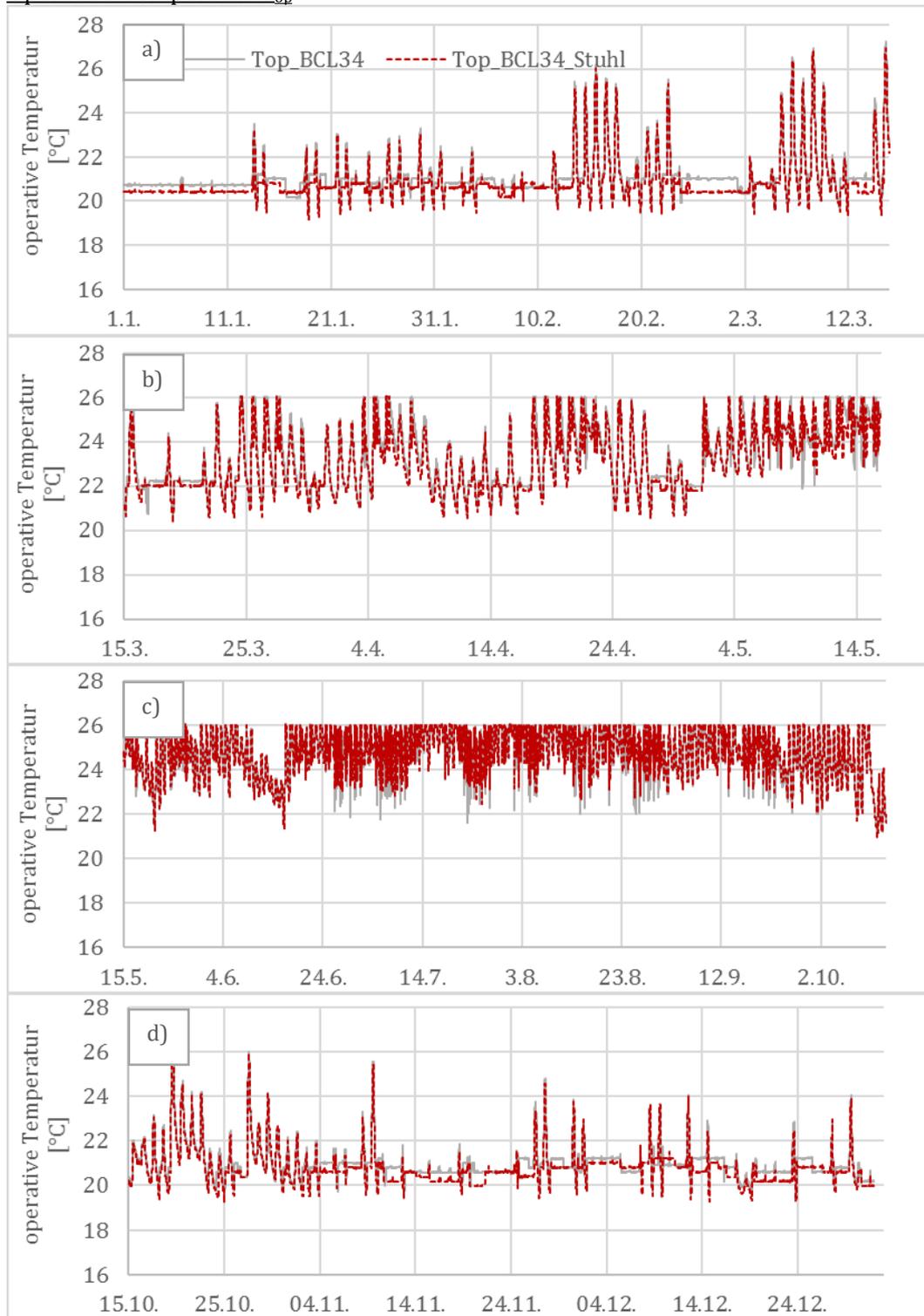


Abbildung 7-8: Operative Temperatur ( $T_{op}$ ) des adaptiven Gebäudereglers ( $T_{op\_BCL34}$ ) und der Variante mit Bürostuhl ( $T_{op\_BCL34\_Stuhl}$ ) während der Simulationsperiode vom a) 1. Januar bis 15. März, b) 15. März bis 15. Mai, c) 15. Mai bis 15. Oktober, d) 15. Oktober bis 31. Dezember

## Globale Behaglichkeit

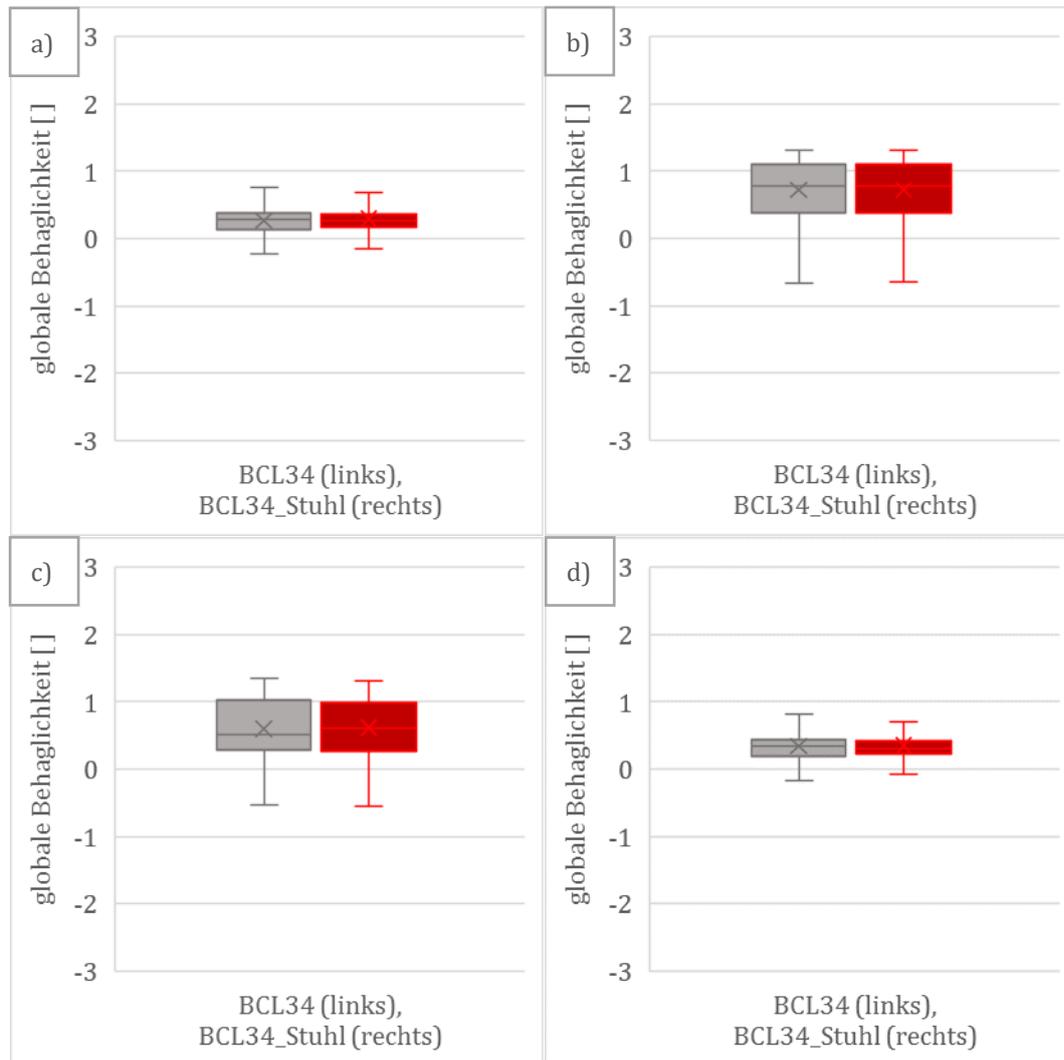


Abbildung 7-9: Globale Behaglichkeit des adaptiven Reglers (BCL34) und der Variante mit Bürostuhl (BCL34\_Stuhl) für die Simulationsperiode vom a) 1. Januar bis zum 15. März, b) 15. März bis 15. Mai, c) 15. Mai bis 15. Oktober, d) 15. Oktober bis 31. Dezember

Der Vergleich der thermischen Behaglichkeit (Abbildung 7-9a) für die Simulationsperiode vom 1. Januar bis zum 15. März zeigt, dass die Interquartilsbereiche sehr konzentriert im Bereich von 0,1 bis circa 0,5 liegen. Der untere Whisker liegt bei -0,23 für BCL34 sowie -0,15 für BCL34\_\*. Der obere Whisker reicht bis zu 0,76 für BCL34 und bis zu 0,67 für BCL34\_\*.

Beim Vergleich der Behaglichkeit für die Simulationsperiode vom 15. März bis zum 15. Mai (Abbildung 7-9b) sieht man, dass der Median in beiden Fällen im positiven Bereich um 0,5 liegt. Ein Vergleich der Histogramme im Anhang C zeigt, dass die Werte im Bereich von 0,2 bis 0,4 bei der Variante (BCL34\_\*) im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34) abnehmen, dagegen aber eine minimale Zunahme im Bereich von 0 bis 0,2 und eine Zunahme im Bereich von 0,4 bis 1,2 erfolgt.

Während der Simulationsperiode vom 15. Mai bis zum 15. Oktober zeigen beide Regler sehr ähnliche Behaglichkeitswerte (Abbildung 7-9). Auch die Häufigkeitsverteilung der Histogramme zeigt für die Variante und den adaptiven Regler ähnliche Werte (Anhang C ). Es ist eine leichte Steigerung der Minimalwerte für die Variante (BCL34\_\*) im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34) sichtbar. Die Behaglichkeitswerte beider Regler liegen überwiegend im positiven Bereich.

Abbildung 7-9d zeigt die Behaglichkeitswerte während der Simulationsperiode vom 15. Oktober bis zum 31. Dezember. Die Interquartilsbereiche der beiden Regler sind relativ gleich. Der untere Whisker der Variante (BCL34\_\*) ist minimal höher gegenüber dem des adaptiven Reglers (BCL34). Die Histogramme (Anhang C ) belegen eine deutliche Zunahme der Werte im Bereich von 0,2 bis 0,4 für die Variante (BCL34\_\*) im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34).

### Heizwärme- und Kühlbedarf

Tabelle 7-8 und Tabelle 7-9 vergleichen den Heizwärme- (HWB) und Kühlbedarf (KB) der vier Betrachtungszeiträume für Winter, Übergang, Sommer und für ein Jahr. Die Winterperiode setzt sich aus den beiden Winterperioden vom 1. Januar bis zum 15. März und vom 15. Oktober bis zum 31. Dezember zusammen. Zusätzlich wird der Stromverbrauch des Bürostuhls mit Heiz- und Kühlfunktion aufgeführt. Der Stromverbrauch bezieht sich auf einen prototypischen Raum mit 15 m<sup>2</sup> Fläche. Die elektrische Leistung des Bürostuhls liegt bei 16 Watt für die Heizfunktion und bei 8 Watt für die Kühlfunktion.

*Tabelle 7-8: Heizwärme- (HWB) und Kühlbedarf (KB) des adaptiven Reglers (BCL34) und der Variante mit Bürostuhl (BCL34\_Stuhl) eines Büros mit 15 m<sup>2</sup> Fläche, Stromverbrauch des Bürostuhls mit Heiz- und Kühlfunktion, \*Reduktion gegenüber BCL34*

Vergleich BCL34 und BCL34_Stuhl								
Betrachtungs- zeitraum	Winter [a),d)]		Übergang [b)]		Sommer [c)]		Jahr	
Gebäuderegler	BCL34	BCL34 _Stuhl	BCL34	BCL34 _Stuhl	BCL34	BCL34 _Stuhl	BCL34	BCL34 _Stuhl
HWB [kWh/m <sup>2</sup> ]	48	47	5	5	0	0	54	52
KB [kWh/m <sup>2</sup> ]	0	0	7	6	43	42	49	48
Reduktion HWB* (kWh/m <sup>2</sup> )	3.5% (1.7)		2.6% (0.1)		--		3.4% (1.8)	
Reduktion KB* (kWh/m <sup>2</sup> )	--		11.6% (0.8)		0.9% (0.4)		2.5% (1.2)	
Stromverbrauch Stuhl [kWh <sub>el</sub> ]	--	39	--	9	--	4	--	52
Stromverbrauch Stuhl [kWh <sub>el</sub> /m <sup>2</sup> ]	--	2.6	--	0.6	--	0.3	--	3.4

Tabelle 7-9: Heizwärme- (HWB) und Kühlbedarf (KB) des Basisreglers (BCL00) und der Variante mit Bürostuhl (BCL34\_Stuhl) eines Büros mit 15 m<sup>2</sup> Fläche, Stromverbrauch des Bürostuhls mit Heiz- und Kühlfunktion, \*Reduktion gegenüber BCL00

Vergleich BCL00 und BCL34_Stuhl								
Betrachtungs- zeitraum	Winter [a),d)]		Übergang [b)]		Sommer [c)]		Jahr	
Gebäuderegler	BCL00	BCL34 _Stuhl	BCL00	BCL34 _Stuhl	BCL00	BCL34 _Stuhl	BCL00	BCL34 _Stuhl
HWB [kWh/m <sup>2</sup> ]	54	47	5	5	0	0	60	52
KB [kWh/m <sup>2</sup> ]	1	0	7	6	43	42	51	48
Reduktion HWB* (kWh/m <sup>2</sup> )	13.5% (7.3)		3.6% (0.2)		--		12.7% (7.6)	
Reduktion KB* (kWh/m <sup>2</sup> )	--		10.3% (0.7)		2.6% (1.1)		5.4% (2.8)	
Stromverbrauch Stuhl [kWh <sub>el</sub> ]	--	39	--	9	--	4	--	52
Stromverbrauch Stuhl [kWh <sub>el</sub> /m <sup>2</sup> ]	--	2.6	--	0.6	--	0.3	--	3.4

Beim Vergleich des Wärme- und Kühlbedarfs der Gebäudezone für die Winterperiode wird deutlich, dass die Variante mit Stuhl (BCL34\_\*) gegenüber dem Basisregler (BCL00) einen um 13,5 % (Tabelle 7-9) geringeren Wärmebedarf aufzeigt, während es im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34) 3,5 % weniger sind (Tabelle 7-8). Der Anteil des Kühlbedarfs ist während der Winterperiode gering und kann vernachlässigt werden.

Während der Übergangsperiode sinkt sowohl der Heizwärmebedarf als auch der Kühlbedarf. Die Variante (BCL34\_\*) spart 3,6 % des Heizwärmebedarfs und 10,3 % des Kühlbedarfs gegenüber dem Basisregler (BCL00) ein (Tabelle 7-9). Im Vergleich zum adaptiven Regler erfolgt eine Reduktion des Heizwärmebedarfs um 2,6 %, sowie des Kühlbedarfs um 11,6 % (Tabelle 7-8).

Während der Sommerperiode zeigt die Variante (BCL34\_\*) einen um 2,6 % geringeren Kühlbedarf gegenüber dem Basisregler (BCL00) (Tabelle 7-9) und einen um 0,9 % geringeren Kühlbedarf gegenüber dem adaptiven Gebäuderegler (BCL34) (Tabelle 7-8). Während der Sommermonate ist der Heizwärmebedarf gering und kann vernachlässigt werden.

Die Variante (BCL34\_\*) zeigt gegenüber dem adaptiven Regler (BCL34) eine Reduktion des Jahresheizwärme- und Kühlbedarfs. Mit BCL34\_\* lag der Heizwärmebedarf im Vergleich zu BCL34 um 3,4 % (Tabelle 7-8) und im Vergleich zu BCL00 um 12,7 % (Tabelle 7-9) niedriger. Der Kühlbedarf konnte mit BCL34\_\* im Vergleich zu BCL34 um 2,5 % (Tabelle 7-8) und im Vergleich zu BCL00 um 5,4 % reduziert werden (Tabelle 7-9).

### Zusammenfassung

Während der Winterzeit erlaubt die Variante mit Bürostuhl (BCL34\_\*) niedrigere Kühlellwerte (Abbildung 7-7a) und als Folge niedrigere operative Temperaturen (Abbildung 7-8a) gegenüber dem adaptiven Gebäuderegler (BCL34). Dies führt zu einer Reduzierung des Heizwärmebedarfs der Variante (BCL34\_\*) im Vergleich zum adaptiven

Regler (BCL34) und zum Basisregler (BCL00). Der Stromverbrauch des Bürostuhls während dieser Simulationsperiode liegt bei 39 kWh. Durch die Nutzung des Bürostuhls erfolgt vor allem eine Verschiebung der negativen Behaglichkeitswerte, im Vergleich zu BCL34, in Richtung eines positiven Behaglichkeitslevels (Abbildung 7-9a).

Während der Übergangsperiode kann die globale Behaglichkeit (Abbildung 7-9b) auf demselben Level gehalten werden, obwohl die Variante (BCL34\_\*) höhere Raumtemperaturen zulässt (Abbildung 7-8b). Dies führt, im Vergleich zu BCL34, zu einer Reduzierung des Kühlbedarfs für BCL34\_\*. Die Variante (BCL34\_\*) reguliert jedoch oft den unteren Sollwert TL (Heizsollwert), sodass die Reduzierung des Heizenergiebedarfs, im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34) (Tabelle 7-8) und ebenso im Vergleich zum Basisregler (BCL00) (Tabelle 7-9) eher gering ausfällt.

Während der Sommerperiode resultieren die Einsparungen des Kühlbedarfs, vor allem aus der Regulierung der oberen Sollwerttemperatur TU (Kühlsollwert). BCL34\_\* lässt hier wesentlich höhere Sollwerte zu, die sich auch bei den operativen Temperaturen sehen lassen (Abbildung 7-8c). Die Variante (BCL34\_\*) kann die Minimalwerte der Behaglichkeitswerte, im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34) steigern (Abbildung 7-9c). Beide Regler zeigen Ausreißer in den negativen Behaglichkeitsbereich. Diese könnte durch eine Anpassung des Behaglichkeitssollwertes in der Regelungslogik des Gebäudereglers (Kapitel 6.3.3) ausgeglichen werden.

## 7.5 BCL34 / BCL34\_ThW\_Stuhl

Dieser Abschnitt beschreibt die Interaktion der adaptiven Regler-Variante mit den beiden dezentralen Systemen (thermoelektrische Stellwand und Bürostuhl mit Heiz- und Kühlfunktion).

Die Simulationsergebnisse des adaptiven Reglers (BCL34) werden den Simulationsergebnissen der Variante mit beiden dezentralen Systemen (BCL34\_ThW\_Stuhl), nachfolgend auch Variante (BCL34\_\*) genannt, gegenübergestellt.

Es werden die Ergebnisse der vier Simulationsperioden gezeigt. Für jede Simulationsperiode werden die Adaption der Sollwerttemperaturen, die daraus resultierenden operativen Temperaturen, die Behaglichkeitswerte und der Heizwärme- und Kühlbedarf gezeigt.

Sollwerttemperatur  $T_U/TL$  und operative Temperatur  $T_{Op}$

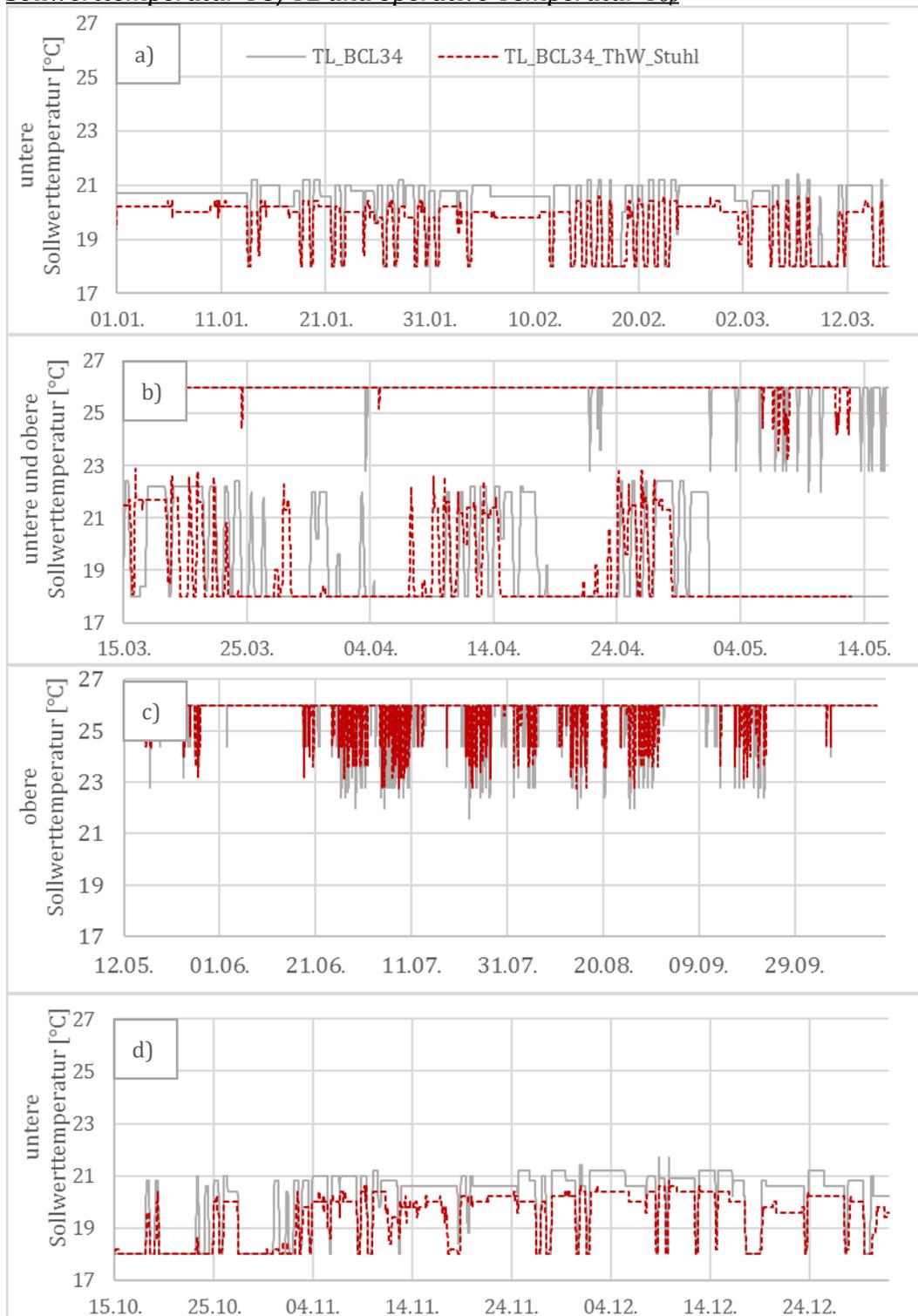


Abbildung 7-10: Heiz- (TL) und Kühlsollwert ( $T_U$ ) des adaptiven Reglers (BCL34) und der Variante mit der thermoelektrischen Stellwand und dem Bürostuhl (BCL34\_ThW\_Stuhl) während der Simulationsperiode vom a) 1. Januar bis 15. März, b) 15. März bis 15. Mai, c) 15. Mai bis 15. Oktober, d) 15. Oktober bis 31. Dezember

### Operative Temperatur $T_{op}$

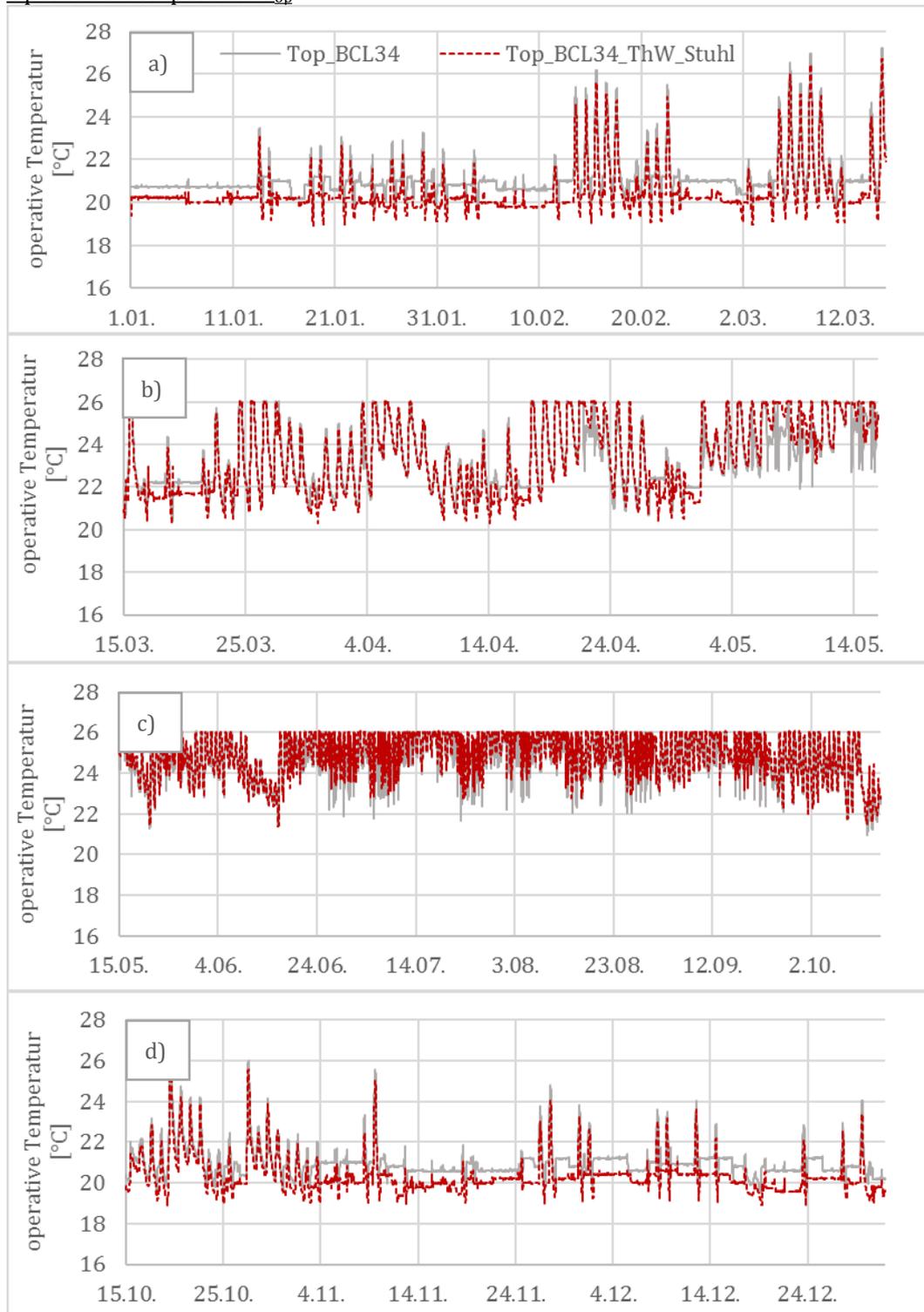


Abbildung 7-11: Operative Temperatur ( $T_{op}$ ) des adaptiven Gebäudereglers ( $T_{op\_BCL34}$ ) und der Variante mit thermoelektrischer Stellwand und Bürostuhl ( $T_{op\_BCL34\_ThW\_Stuhl}$ ) während der Simulationsperiode vom a) 1. Januar bis 15. März, b) 15. März bis 15. Mai, c) 15. Mai bis 15. Oktober, d) 15. Oktober bis 31. Dezember

Abbildung 7-10a zeigt die Sollwertadaptation des unteren Sollwertes TL der beiden Regler während der Simulationsperiode vom 1. Januar bis zum 15. März. Die Variante mit den beiden dezentralen Systemen (BCL34\_\*) zeigt deutlich niedrigere Sollwerte als der adaptive Regler (BCL34). Die Sollwerte der Variante liegen oft zwischen 0,6 bis 0,8 K niedriger im Vergleich zum adaptiven Regler. Dies resultiert in einer niedrigeren operativen Temperatur, die oft um 0,5 K unter der des adaptiven Reglers liegt (Abbildung 7-11a).

Es zeigt sich, dass die Variante (BCL34\_\*) während der Simulationsperiode vom 15. März bis zum 15. Mai für den unteren Sollwert TL niedrigere Temperaturen zulässt und für den oberen Sollwert TU höhere Temperaturen (Abbildung 7-10b). Dadurch liegen mit der Variante (BCL34\_\*) vor allem gegen Ende der Simulationsperiode deutlich höhere operative Temperaturen gegenüber dem adaptiven Regler (BCL34) vor (Abbildung 7-11b).

Während der Simulationsperiode vom 15. Mai bis zum 15. Oktober (Abbildung 7-10c) liegt die obere Sollwerttemperatur der Variante mit beiden dezentralen Systemen (BCL34\_\*) deutlich über der Sollwerttemperatur des adaptiven Reglers (BCL34). Die operative Temperatur ( $T_{op}$ ) der Variante mit beiden dezentralen Systemen (BCL34\_\*) liegt in den meisten Fällen über der des adaptiven Reglers ohne dezentrale Systeme (BCL34). Zu Beginn der Simulation sind die operativen Temperaturen in beiden Fällen auf gleichem Niveau (Abbildung 7-11c).

In der Simulationsperiode vom 15. Oktober bis zum 31. Dezember liegt die untere Sollwerttemperatur der Variante (BCL34\_\*) unter der des adaptiven Reglers (BCL34). Nur vereinzelt liegt die Sollwerttemperatur über der des adaptiven Reglers (Abbildung 7-10d). Die operative Temperatur ( $T_{op}$ ) der Variante (BCL34\_\*) liegt als Folge der Sollwertadaptation während dieser Zeit immer unter der des adaptiven Reglers (BCL34) (Abbildung 7-11d).

### Globale Behaglichkeit

Abbildung 7-12a zeigt die Werte der globalen Behaglichkeit während der Simulationsperiode vom 1. Januar bis zum 15. März. Die Mediane liegen im Bereich von 0,3. Der untere Whisker der Variante (BCL34\_\*) ist höher und liegt bei -0,1, während er beim adaptiven Regler (BCL34) bei -0,3 liegt. Die Häufigkeitsverteilung (Histogramme Anhang C) zeigt, dass die Variante (BCL34\_\*) gegenüber dem adaptiven Regler (BCL34) weniger negative Werte aufweist und eine Steigerung der Werte im Bereich zwischen 0,2 bis 0,4 möglich ist.

Während der Simulationsperiode vom 15. März bis zum 15. Mai (Abbildung 7-12b) unterscheiden sich die Interquartilsbereiche der beiden Regler minimal. Der untere Whisker der Variante liegt bei -0,8, der des adaptiven Reglers bei -0,3. Die Mediane liegen bei 0,5 (BCL34) und 0,6 (BCL34\_\*). Die Häufigkeitsverteilung (Histogramme Anhang C) zeigt, dass eine Zunahme der Werte im Bereich von 0,4 bis 1,0 für die Variante (BCL34\_\*) im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34) erfolgte. Im Vergleich zum

Basisregler (BCL00) ist eine deutliche Zunahme der Werte im Bereich von 0 bis 1,0 sichtbar.

Während der Simulationsperiode vom 15. Mai bis zum 15. Oktober sind die Werte für beide Regler ähnlich (Abbildung 7-12c). Der Interquartilsbereich der Variante (BCL34\_\*) liegt zwischen 0,4 bis 1,0, der des adaptiven Reglers (BCL34) im Bereich zwischen 0,3 bis 1,0. Die Mediane befinden sich bei 0,7 (Abbildung 7-12c). Die Häufigkeitsverteilung (Histogramme Anhang C ), zeigt mit der Variante eine Zunahme der Werte im Bereich von 0,4 bis 1,4.

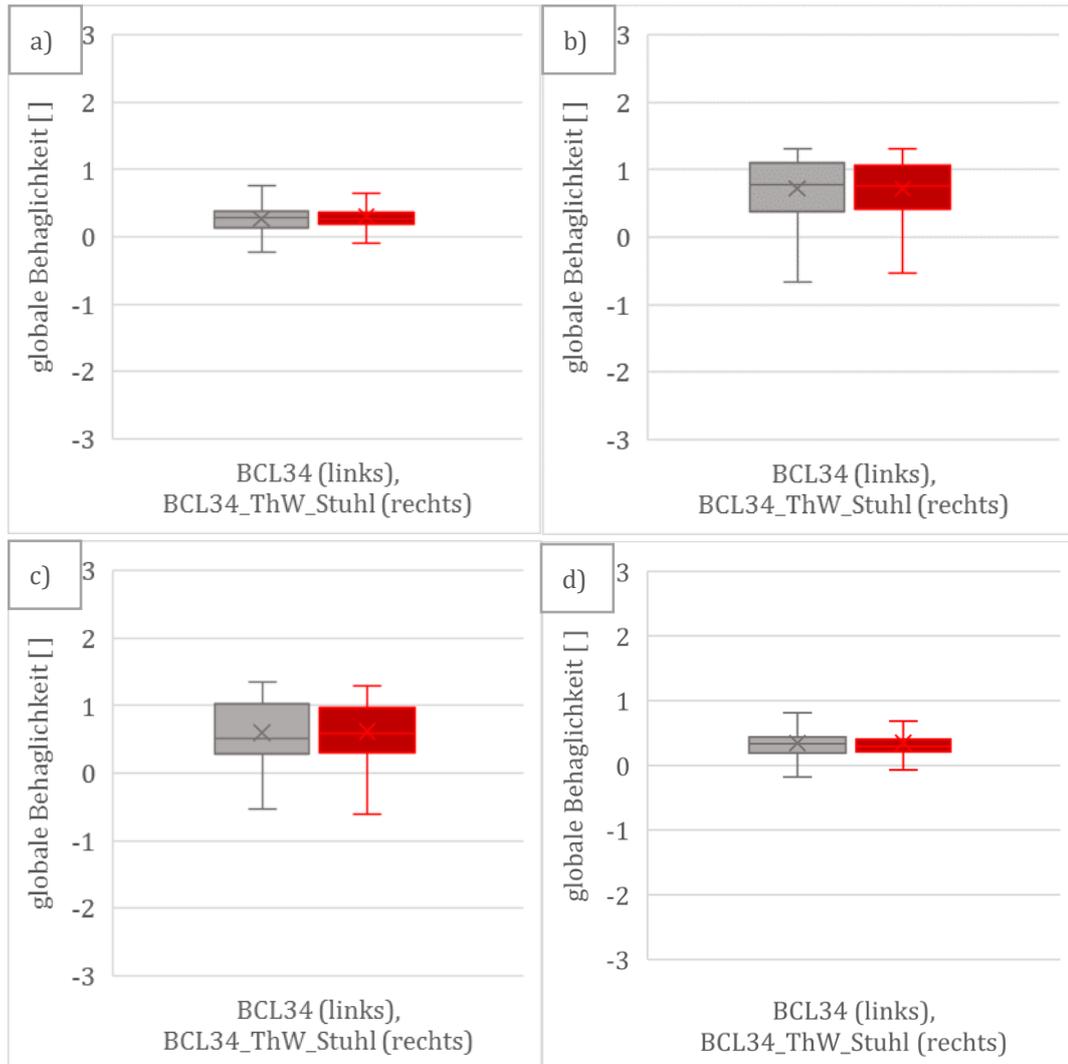


Abbildung 7-12: Globale Behaglichkeit des adaptiven Reglers (BCL34) und der Variante mit der thermoelektrischen Stellwand und dem Bürostuhl (BCL34\_ThW\_Stuhl) für die Simulationsperiode vom a) 1. Januar bis 15. März, b) 15. März bis 15. Mai, c) 15. Mai bis 15. Oktober, d) 15. Oktober bis 31. Dezember

Die globale Behaglichkeit konnte während der Simulationsperiode vom 15. Oktober bis zum 31. Dezember durch den Einfluss der Variante mit beiden dezentralen Systemen (BCL34\_\*) verbessert werden (Abbildung 7-12d). Die Häufigkeitsverteilung (Histogramme Anhang C ) zeigt, dass im Bereich von 0,2 bis 0,4 eine Häufung der Behaglichkeitswerte für die Variante (BCL34\_\*) vorkommt. Gegenüber BCL34 liegen weniger Werte im negativen Bereich vor.

## Heizwärme- und Kühlbedarf

Tabelle 7-10 und Tabelle 7-11 vergleichen den Heizwärme- und Kühlbedarf der vier Betrachtungszeiträume für Winter, Übergang, Sommer und für ein Jahr. Zusätzlich werden der Stromverbrauch der thermoelektrischen Stellwand und des Bürostuhls mit Heiz- und Kühlfunktion aufgeführt. Der Stromverbrauch bezieht sich auf einen prototypischen Raum mit 15 m<sup>2</sup> Fläche.

*Tabelle 7-10: Heizwärme- (HWB) und Kühlbedarf (KB) des adaptiven Reglers (BCL34) und der Variante mit thermoelektrischer Heiz- und Kühlwand und Bürostuhl (BCL34\_ThW\_Stuhl) eines Büros mit 15 m<sup>2</sup> Fläche, Stromverbrauch der thermoelektrischen Heiz- und Kühlwand und des Bürostuhls mit Heiz- und Kühlfunktion, \*Reduktion gegenüber BCL34*

Vergleich BCL34 und BCL34_ThW_Stuhl								
Betrachtungszeitraum	Winter [a),d)]		Übergang [b)]		Sommer [c)]		Jahr	
Gebäuderegler	BCL34	BCL34_ThW_Stuhl	BCL34	BCL34_ThW_Stuhl	BCL34	BCL34_ThW_Stuhl	BCL34	BCL34_ThW_Stuhl
HWB [kWh/m <sup>2</sup> ]	48	44	5	5	0	0	54	48
KB [kWh/m <sup>2</sup> ]	0	0	7	6	43	42	49	47
Reduktion HWB* (kWh/m <sup>2</sup> )	9.8% (4.8)		15.0% (0.8)		--		10.1% (5.5)	
Reduktion KB* (kWh/m <sup>2</sup> )	--		13.9% (0.9)		2.4% (1.0)		4.1% (2.0)	
Stromverbrauch ThW [kWh <sub>el</sub> ]	--	114	--	29	--	30	--	173
Stromverbrauch ThW [kWh <sub>el</sub> /m <sup>2</sup> ]	--	7.5	--	1.9	--	2.0	--	11.5
Stromverbrauch Stuhl [kWh <sub>el</sub> ]	--	25	--	6	--	4	--	35
Stromverbrauch Stuhl [kWh <sub>el</sub> /m <sup>2</sup> ]	--	1.7	--	0.4	--	0.2	--	2.3

Während der Winterperiode zeigt die Variante mit beiden dezentralen Systemen (BCL34\_\*) im Vergleich zum Basisregler (BCL00) einen um 19,2 % reduzierten Heizwärmebedarf (Tabelle 7-11). Im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34) sind es 9,8 % weniger, die die Variante mit beiden dezentralen Systemen benötigt (Tabelle 7-10). Der Anteil des Kühlbedarfs ist sehr gering und wird daher in der Analyse vernachlässigt.

Während der Übergangsphase zeigt die Variante (BCL34\_\*) im Vergleich zum Basisregler (BCL00) eine Reduktion des Heizwärmebedarfs um 15,8 % (Tabelle 7-11). Im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34) kann der Heizwärmebedarf um rund 15 % reduziert werden (Tabelle 7-10). Der Kühlbedarf kann um 12,6 % gegenüber dem Basisregler (BCL00) (Tabelle 7-11) und um rund 14 % gegenüber dem adaptiven Regler (BCL34) reduziert werden (Tabelle 7-10).

Während der Sommerperiode zeigt die Variante (BCL34\_\*) eine Reduktion des Kühlbedarfs von rund 4 % im Vergleich zu BCL00 (Tabelle 7-11) und von 2,4 %

gegenüber BCL34 (Tabelle 7-10). Der Anteil des Heizwärmebedarfs wird während der Sommermonate vernachlässigt, da er sehr gering ist.

Im Jahresverlauf zeigt die Variante mit den beiden dezentralen Systemen (BCL34\_\*) positive Werte. BCL34\_\* zeigt einen um 18,8 % niedrigeren Heizwärmebedarf gegenüber dem Basisregler (BCL00) (Tabelle 7-11). Im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34) sind es 10,1 % weniger (Tabelle 7-10). Der Kühlbedarf kann mit der Variante (BCL34\_\*) gegenüber dem Basisregler (BCL00) um rund 7 % (Tabelle 7-11), gegenüber dem adaptiven Regler (BCL34) um rund 4 % (Tabelle 7-10) reduziert werden.

*Tabelle 7-11: Heizwärme- (HWB) und Kühlbedarf (KB) des Basisreglers (BCL00) und der Variante mit thermoelektrischer Heiz- und Kühlwand und Bürostuhl (BCL34\_ThW\_Stuhl) eines Büros mit 15 m<sup>2</sup> Fläche, Stromverbrauch der thermoelektrischen Heiz- und Kühlwand und des Bürostuhls mit Heiz- und Kühlfunktion, \*Reduktion gegenüber BCL00*

<b>Vergleich BCL00 und BCL34_ThW_Stuhl</b>								
Betrachtungszeitraum	Winter [a), d)]		Übergang [b)]		Sommer [c)]		Jahr	
Gebäuderegler	BCL00	BCL34_ThW_Stuhl	BCL00	BCL34_ThW_Stuhl	BCL00	BCL34_ThW_Stuhl	BCL00	BCL34_ThW_Stuhl
HWB [kWh/m <sup>2</sup> ]	54	44	5	5	0	0	60	48
KB [kWh/m <sup>2</sup> ]	1	0	7	6	43	42	51	47
Reduktion HWB* (kWh/m <sup>2</sup> )	19.2% (10.4)		15.8% (0.9)		--		18.8% (11.2)	
Reduktion KB* (kWh/m <sup>2</sup> )	--		12.6% (0.8)		4.1% (1.8)		7.0% (3.6)	
Stromverbrauch ThW [kWh <sub>el</sub> ]	--	114	--	29	--	30	--	173
Stromverbrauch ThW [kWh <sub>el</sub> /m <sup>2</sup> ]	--	7.5	--	1.9	--	2.0	--	11.5
Stromverbrauch Stuhl [kWh <sub>el</sub> ]	--	25	--	6	--	4	--	35
Stromverbrauch Stuhl [kWh <sub>el</sub> /m <sup>2</sup> ]	--	1.7	--	0.4	--	0.2	--	2.3

### Zusammenfassung

Die Variante kann durch die Hinzunahme der beiden dezentralen Heiz- und Kühlsysteme (BCL34\_\*) während den Winterperioden niedrigere Raumtemperaturen erlauben, was wiederum zu einer Reduzierung des Heizwärmebedarfs führt. Zusätzlich können die Behaglichkeitswerte, vor allem die Minimalwerte, im Vergleich zum adaptiven Gebäuderegler (BCL34) gesteigert werden (Abbildung 7-12a,d).

Während der Übergangszeit zeigt BCL34\_\* gegenüber BCL34 und gegenüber BCL00 einen reduzierten Heiz- sowie reduzierten Kühlbedarf.

Während der Sommerperiode erlaubt die Variante (BCL34\_\*) deutlich höhere Sollwerte gegenüber BCL34 (Abbildung 7-10c). Dadurch liegt auch die operative Temperatur ( $T_{op}$ )

der Variante mit beiden dezentralen Systemen (BCL34\_\*) in den meisten Fällen über der des adaptiven Reglers (BCL34), sodass der Kühlbedarf der Variante (BCL34\_\*) im Vergleich zum Basisregler (BCL00) und im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34) reduziert werden kann. Die Häufigkeitsverteilung (Histogramme Anhang C ) zeigt gegenüber BCL34 eine Zunahme der Werte im Bereich von 0,4 bis 1,4 für BCL34\_\*. Generell liegen die Behaglichkeitswerte überwiegend im positiven Bereich. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Variante mit beiden dezentralen Systemen (BCL34\_\*) sowohl zu einer Verbesserung der thermischen Behaglichkeit als auch zu einer Reduktion des Heizwärme- und Kühlbedarfs führt.

## 7.6 Varianten mit Ventilator

In diesem Kapitel werden zwei Varianten des adaptiven Reglers mit Ventilator vorgestellt. Der Ventilator wurde innerhalb der beiden Varianten BCL34\_ThW\_Stuhl\_Vent und BCL34\_Stuhl\_Vent implementiert. Die Varianten werden nachfolgend mit BCL34\_\* abgekürzt. Zusätzlich zur Standard-Variante mit Ventilator und einem oberen Sollwert von  $TU = 26\text{ °C}$  (BCL34\_\*26) wird für die Übergangs- und Sommerzeit eine Variante mit einem erhöhten oberen Sollwert von  $TU = 30\text{ °C}$  dargestellt (BCL34\_\*30). Dies wurde für die Winterperioden (1. Januar bis 15. März und 15. Oktober bis 31. Dezember) nicht durchgeführt, da dies nicht zweckmäßig ist. Der obere Sollwert von  $TU = 26\text{ °C}$  stellt den Normalfall in allen Simulationen dar. Dies gilt sowohl für den adaptiven Regler (BCL34) als auch für die Varianten (BCL34\_\*).

### 7.6.1 BCL34 /BCL34\_ThW\_Stuhl\_Vent

#### Sollwerttemperatur $TU/TL$ und operative Temperatur $T_{op}$

Auf den folgenden Seiten werden die Diagramme der Sollwertadaption des adaptiven Reglers (BCL34) und der Variante mit thermoelektrischer Heiz- und Kühlwand, dem Bürostuhl und des Ventilators (BCL34\_\*) gezeigt.

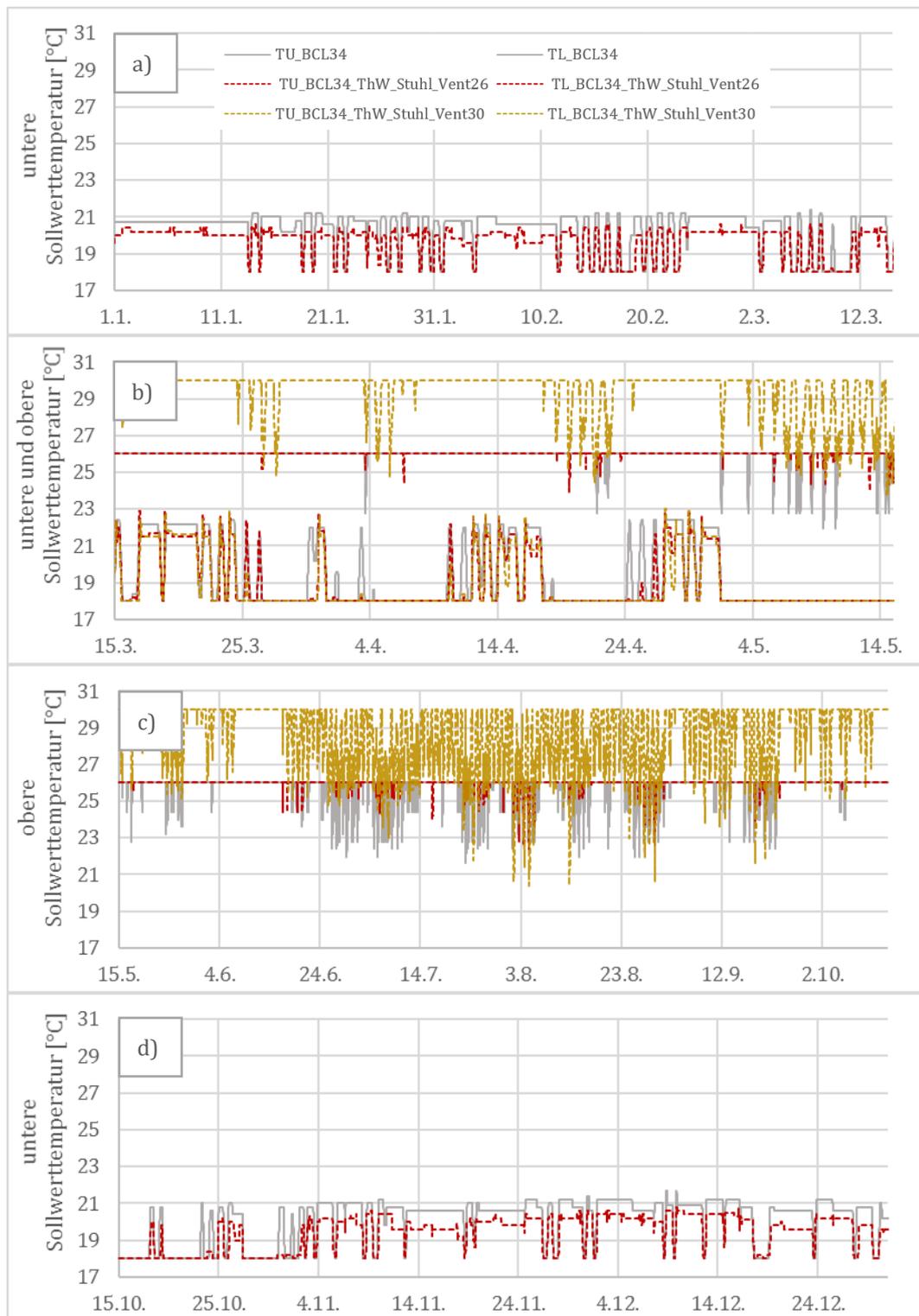


Abbildung 7-13: Heiz- (TL) und KÜhlsollwert (TU) des adaptiven Reglers (BCL34) und der Variante mit der thermoelektrischen Stellwand, Bürostuhl und Ventilator (BCL34\_ThW\_Stuhl\_Vent\*) während der Simulationsperiode vom a) 1. Januar bis 15. März, b) 15. März bis 15. Mai, c) 15. Mai bis 15. Oktober, d) 15. Oktober bis 31. Dezember, zusätzlich Variante mit erhöhtem oberen Sollwert von 30 °C für b) und c)

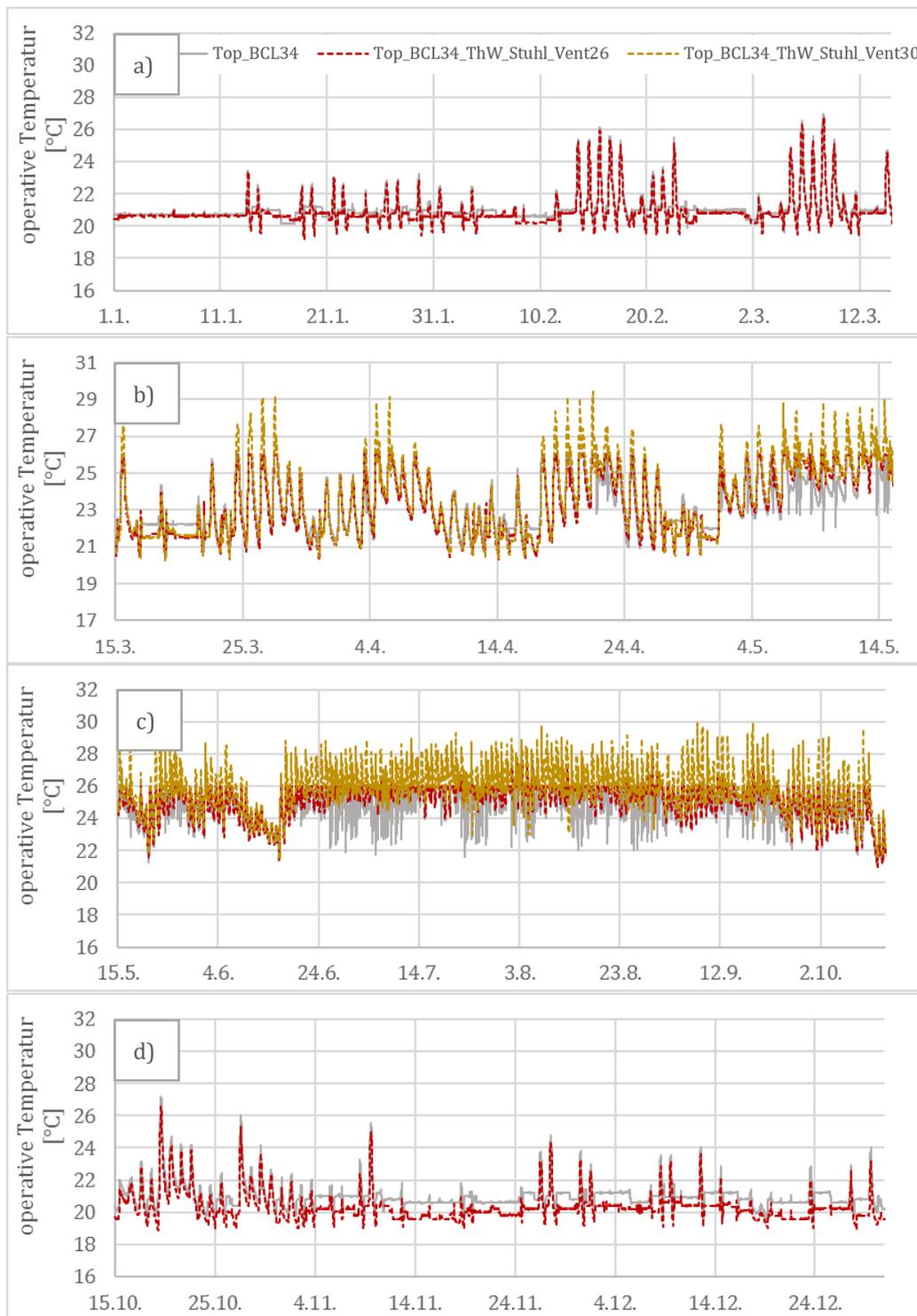


Abbildung 7-14: Operative Temperatur ( $T_{op}$ ) des adaptiven Reglers (BCL34) und der Variante mit der thermoelektrischen Stellwand, Bürostuhl und Ventilator (BCL34\_ThW\_Stuhl\_Vent\*) während der Simulationsperiode vom a) 1. Januar bis 15. März, b) 15. März bis 15. Mai, c) 15. Mai bis 15. Oktober, d) 15. Oktober bis 31. Dezember, zusätzlich Variante mit erhöhtem oberen Sollwert von 30 °C für b) und c)

Abbildung 7-13a zeigt die Sollwertadaptation des unteren Sollwertes TL der beiden Regler während der Simulationsperiode vom 1. Januar bis zum 15. März. Die Variante mit den dezentralen Systemen (BCL34\_\*) zeigt durchgehend niedrigere Sollwerte (zwischen 0,6

bis 0,8 °K) als der adaptive Regler (BCL34). Dies resultiert in einer niedrigeren operativen Temperatur (Abbildung 7-14a).

Es zeigt sich, dass die Variante (BCL34\_\*26) während der Simulationsperiode vom 15. März bis zum 15. Mai für den unteren Sollwert TL niedrigere Temperaturen zulässt und für den oberen Sollwert TU höhere Temperaturen (Abbildung 7-13b) im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34.) Dadurch liegen mit der Variante (BCL34\_\*) vor allem gegen Ende der Simulationsperiode deutlich höhere operative Temperaturen gegenüber dem adaptiven Regler (BCL34) vor (Abbildung 7-14b). Bei der Variante mit dem erhöhten oberen Sollwert (BCL34\_\*30) liegen die operativen Temperaturen deutlich höher im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34) und auch zur Variante mit dem üblichen oberen Sollwert von  $TU = 26\text{ °C}$  (BCL34\_\*26). Die beiden adaptiven Varianten (BCL34\_\*) erlauben niedrigere untere Sollwerte und somit auch niedrigere operative Temperaturen (Abbildung 7-14b).

Während der Simulationsperiode vom 15. Mai bis zum 15. Oktober (Abbildung 7-13c) liegt die obere Sollwerttemperatur der Variante mit beiden dezentralen Systemen (BCL34\_\*26) deutlich über der Sollwerttemperatur des adaptiven Reglers (BCL34). In Folge liegt die operative Temperatur ( $T_{op}$ ) der Variante mit dezentralen Systemen (BCL34\_\*) in den meisten Fällen über der des adaptiven Reglers ohne dezentrale Systeme (BCL34) (Abbildung 7-14c). Bei der Variante mit erhöhtem Sollwert (BCL34\_\*30) liegen auch die operativen Temperaturen deutlich höher. Gleichzeitig gibt es vereinzelte Tage, an denen die obere Sollwerttemperatur deutlich unter der des adaptiven Reglers (BCL34) und der Variante (BCL34\_\*26) geregelt wird. Dies erklärt sich dadurch, dass vereinzelt das thermische Empfinden ( $So_{BCL34_*30}$ ) im Vergleich zum Regler mit  $26\text{ °C}$  (BCL34\_\*26) stärker ansteigt, sodass die Behaglichkeit schneller sinkt. Dadurch wird der obere Sollwert TU, gemäß der Regelungslogik, in größeren Schritten adaptiert, sodass es vereinzelt zu geringeren oberen Sollwerten kommen kann (siehe Abbildung 10-16 im Anhang D).

In der Simulationsperiode vom 15. Oktober bis zum 31. Dezember liegt die untere Sollwerttemperatur der Variante (BCL34\_\*) unter der des adaptiven Reglers (BCL34) (Abbildung 7-13d) und als Folge liegt die operative Temperatur ( $T_{op}$ ) der Variante immer unter der des adaptiven Reglers (Abbildung 7-14d).

## Globale Behaglichkeit

Die globale Behaglichkeit der Regler wird in Abbildung 7-15 anhand von Boxplot-Diagrammen verglichen.

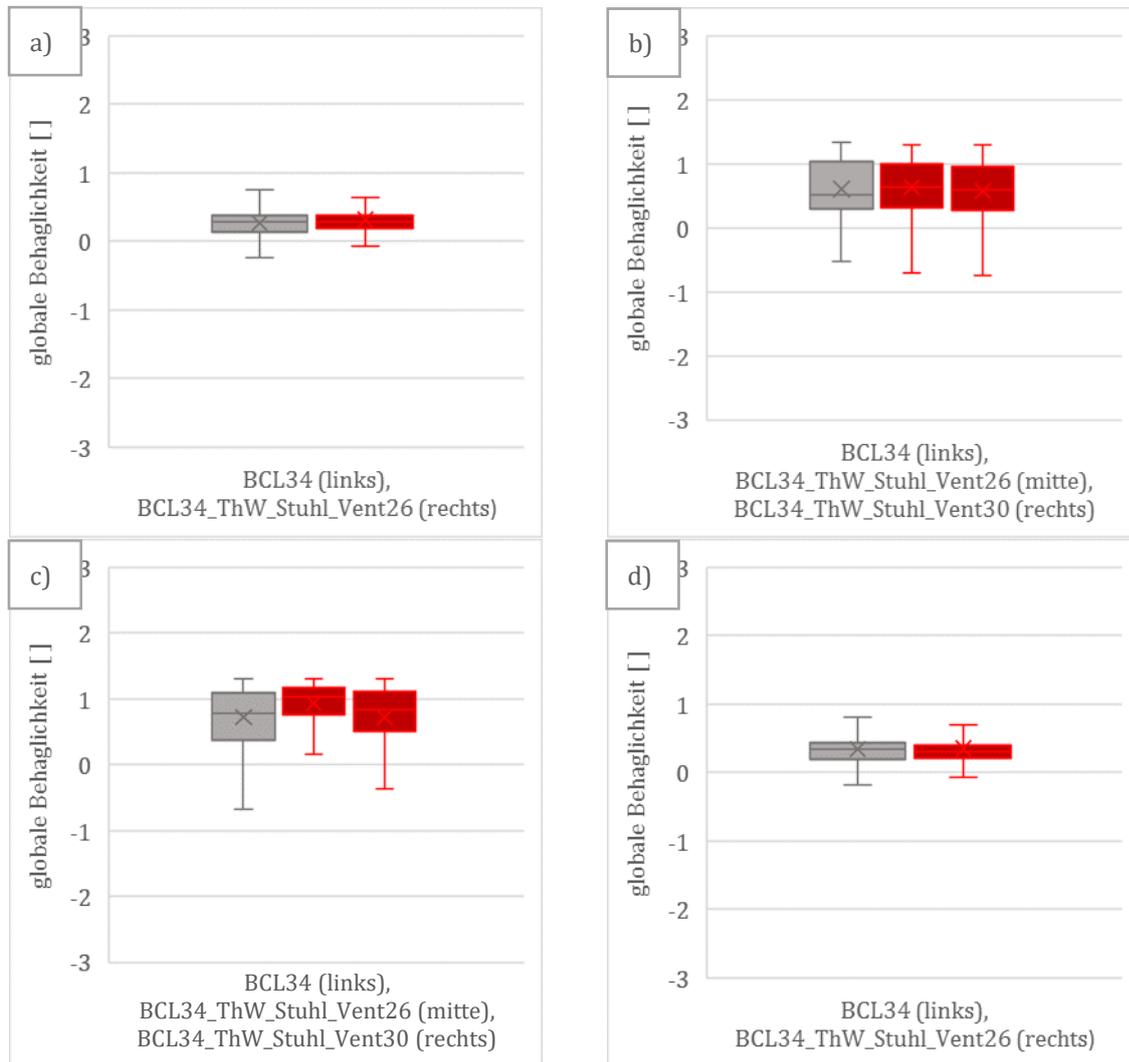


Abbildung 7-15: Behaglichkeit des adaptiven Reglers (BCL34) und der Variante mit der thermoelektrischen Stellwand, Bürostuhl und Ventilator (BCL34\_ThW\_Stuhl\_Vent\*) während der Simulationsperiode vom a) 1. Januar bis 15. März, b) 15. März bis 15. Mai, c) 15. Mai bis 15. Oktober, d) 15. Oktober bis 31. Dezember, zusätzlich Variante mit erhöhtem oberen Sollwert von 30 °C für b) und c)

Abbildung 7-15a zeigt die Werte der globalen Behaglichkeit während der Simulationsperiode vom 1. Januar bis zum 15. März. Bei beiden Reglern liegt der Median im Bereich von 0,3. Der Interquartilsbereich der Variante (BCL34\_\*) liegt im Bereich zwischen 0,19 bis 0,37, im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34) der im Bereich zwischen 0,14 bis 0,39 liegt. Die Maximalwerte des adaptiven Reglers (BCL34) liegen bei 1,2, die der Variante (BCL34\_\*) bei 1,1. Die Häufigkeitsverteilung (Histogramme Anhang C) zeigt, dass die Variante (BCL34\_\*) weniger negative Werte aufweist als der adaptive Regler (BCL34). Eine deutliche Steigerung der Werte ist im Bereich 0,2 bis 0,4 im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34) möglich.

Während der Simulationsperiode vom 15. März bis zum 15. Mai (Abbildung 7-15b) unterscheiden sich die Interquartilsbereiche der globalen Behaglichkeit der Regler minimal. Der Median liegt bei allen Regler-Varianten im positiven Bereich. Bei den Varianten liegt er gegenüber dem adaptiven Regler um 0,2 (BCL34\_\*26) und 0,1 (BCL34\_\*30) höher. Die Häufigkeitsverteilung (Histogramme Anhang C) zeigt, dass eine Zunahme der Werte im Bereich von 0,4 bis 1,0 für die Variante BCL34\_\*26 im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34) erfolgte. Gleichzeitig erfolgt auch eine Abnahme der Werte im Bereich von 1,2 bis 1,4 im Vergleich zu BCL34. Die Variante mit dem erhöhten oberen Sollwert von TU = 30 °C zeigt ähnliche Ergebnisse. Im Vergleich zu BCL34\_\*26 kommt es zu einer minimalen Zunahme der Werte im Bereich von 0,6 bis 1,0 und zu einer Abnahme der Werte im Bereich von 1,0 bis 1,4.

Positiv anzumerken ist, dass die globale Behaglichkeit aller Regler-Varianten während der Simulationsperiode vom 15. Mai bis zum 15. Oktober (Abbildung 7-15c) überwiegend im positiven Bereich liegt. Die Interquartilsbereiche der Varianten (BCL34\_\*) sind komprimierter und liegen im höheren positiven Bereich. Der Interquartilsbereich von BCL34\_\*26 liegt im Bereich von 0,7 bis 1,1, der von BCL34\_\*30 im Bereich zwischen 0,6 bis 1,0 im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34) mit einem Interquartilsbereich von 0,4 bis 1,0. Dies zeigt, dass der Ventilator einen großen Einfluss auf die Behaglichkeit hat. Die Whisker von BCL34\_\* liegen bei 0,1 (BCL34\_\*26) und bei -0,3 (BCL34\_\*30) und liegen somit über dem Whisker von BCL34 der bis zu einem Wert von -0,8 reicht. Die Maximalwerte aller drei Regler liegen bei 1,3. Die Häufigkeitsverteilung (Histogramme Anhang C) zeigt gegenüber dem adaptiven Regler (BCL34) eine Zunahme der Werte im Bereich von 0,6 bis 1,4 für die Variante BCL34\_\*26. Für den Bereich von 1,2 bis 1,4 sind auch große Steigerungen im Vergleich zum Basisregler (BCL00) erkennbar. Vergleicht man die Variante BCL34\_\*30 mit einem erhöhten oberen Sollwert von TU = 30 °C mit der Variante BCL34\_\*26 mit TU = 26 °C kommt es zu einer Abnahme der Werte im Bereich von 0,8 bis 1,4 für die Variante BCL34\_\*30.

Die globalen Behaglichkeitswerte liegen während der Simulationsperiode vom 15. Oktober bis zum 31. Dezember für die beiden Regler BCL34 und BCL34\_\* gleich auf (Abbildung 7-15d). Der negative Whisker der Variante (BCL34\_\*) liegt um 0,1 über dem des adaptiven Reglers (BCL34). Die Maximalwerte liegen bei 1,2 für beide Regler. Die Häufigkeitsverteilung (Histogramme Anhang C) zeigt, dass im Bereich von 0,2 bis 0,4 eine Häufung der Behaglichkeitswerte für die Variante (BCL34\_\*26) vorliegt.

### Heizwärme- und Kühlbedarf

Die folgenden Tabellen vergleichen den Heizwärme- (HWB) und Kühlbedarf (KB) der vier Betrachtungszeiträume für Winter, Übergang, Sommer und für ein Jahr. Zusätzlich werden der Stromverbrauch der thermoelektrischen Stellwand, des Bürostuhls mit Heiz- und Kühlfunktion und des Ventilators aufgeführt. Der Stromverbrauch bezieht sich auf einen prototypischen Raum mit 15 m<sup>2</sup> Fläche. Die Winterperiode setzt sich aus den zwei Simulationsperioden vom 1. Januar bis zum 15. März und vom 15. Oktober bis zum 31. Dezember zusammen.

Tabelle 7-12 und Tabelle 7-14 zeigen die Werte der Regler-Variante mit dem oberen Sollwert von  $TU = 26\text{ °C}$  (BCL34\_\*26). Tabelle 7-12 präsentiert den Vergleich mit dem adaptiven Regler (BCL34) und Tabelle 7-14 den Vergleich mit dem Basisregler (BCL00). Tabelle 7-13 und Tabelle 7-15 zeigen analog dazu die Sollwerterweiterung der Regler-Variante auf den oberen Sollwert von  $TU = 30\text{ °C}$ .

Während der Winterperiode zeigt die Variante mit den dezentralen Systemen (BCL34\_\*26) im Vergleich zum Basisregler (BCL00) einen um 19,3 % reduzierten Heizenergiebedarf (Tabelle 7-14). Im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34) sind es 10,0 % weniger, die die Variante mit dezentralen Systemen benötigt (Tabelle 7-12). Der Anteil des Kühlbedarfs ist sehr gering und wird daher in der Analyse vernachlässigt.

Während der Übergangsphase zeigt die Variante BCL34\_\*26 im Vergleich zum Basisregler (BCL00) eine Reduktion des Heizwärmebedarfs um 14,8 % (Tabelle 7-14) und die Variante BCL34\_\*30 eine Reduktion um 20,2 % (Tabelle 7-15). Im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34) kann der Heizwärmebedarf um rund 13,9 % (BCL34\_\*26) (Tabelle 7-12) und 19,4 % (BCL34\_\*30) reduziert werden (Tabelle 7-13). Der Kühlbedarf kann um 13,3 % (BCL34\_\*26) und 31,4 % (BCL34\_\*30) gegenüber dem Basisregler (BCL00) (Tabelle 7-14, Tabelle 7-15) und um 14,6 % (BCL34\_\*26) und 32,4 % (BCL34\_\*30) gegenüber dem adaptiven Regler (BCL34) reduziert werden (Tabelle 7-12, Tabelle 7-13).

Während der Sommerperiode zeigt die Variante BCL34\_\*26 eine Reduktion des Kühlbedarfs um 9,5 %, die Variante BCL34\_\*30 eine Reduktion um 20,4 % im Vergleich zu BCL00 (Tabelle 7-14, Tabelle 7-15). Gegenüber BCL34 (Tabelle 7-12, Tabelle 7-13) kann eine Reduktion von 7,9 % (BCL34\_\*26) und 19,0 % (BCL34\_\*30) erreicht werden. Der Anteil des Heizwärmebedarfs wird während der Sommermonate vernachlässigt, da er sehr gering ist.

Im Jahresverlauf zeigt die Variante mit den dezentralen Systemen (BCL34\_\*) positive Ergebnisse im Hinblick auf die Reduktion des Heizwärme- und Kühlbedarfs. BCL34\_\*26 zeigt einen um 19 % und BCL34\_\*30 einen um 19,6 % niedrigeren Heizwärmebedarf gegenüber dem Basisregler (BCL00) (Tabelle 7-14, Tabelle 7-15). Im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34) sind es 10,3 % (BCL34\_\*26) und 10,9 % (BCL34\_\*30) weniger (Tabelle 7-12, Tabelle 7-13). Der Kühlbedarf kann mit der Variante BCL34\_\*26 gegenüber dem Basisregler (BCL00) um 11,7 % und mit der Variante BCL34\_\*30 um 23,2 % (Tabelle 7-14, Tabelle 7-15) gesenkt werden. Gegenüber dem adaptiven Regler kann der Kühlbedarf um 8,9 % (BCL34\_\*26) und 20,9 % (BCL34\_\*30) reduziert werden (Tabelle 7-12, Tabelle 7-13).

Tabelle 7-12: Heizwärme- (HWB) und Kühlbedarf (KB) des adaptiven Reglers (BCL34) und der Variante mit Stellwand, Bürostuhl, Ventilator (BCL34\_ThW\_Stuhl\_Vent) eines Büros mit 15 m<sup>2</sup> Fläche für den oberen Sollwert von TU = 26 °C, Stromverbrauch der Stellwand, des Bürostuhls und des Ventilators, \*Reduktion gegenüber BCL34

Vergleich BCL34 und BCL34_ThW_Stuhl_Vent26								
Betrachtungszeitraum	Winter [a, d]]		Übergang [b]]		Sommer [c]]		Jahr	
Gebäuderegler	BCL34	BCL34_*26	BCL34	BCL34_*26	BCL34	BCL34_*26	BCL34	BCL34_*26
HWB [kWh/m <sup>2</sup> ]	48	44	5	5	0	0	54	48
KB [kWh/m <sup>2</sup> ]	0	0	7	6	43	39	49	45
Reduktion HWB* (kWh/m <sup>2</sup> )	10.0% (4.8)		13.9% (0.7)		--		10.3% (5.6)	
Reduktion KB* (kWh/m <sup>2</sup> )	--		14.6% (1.0)		7.9% (3.4)		8.9% (4.4)	
Stromverbrauch ThW [kWh <sub>el</sub> ]	--	113	--	28	--	31	--	173
Stromverbrauch ThW [kWh <sub>el</sub> /m <sup>2</sup> ]	--	7.5	--	1.9	--	2.1	--	11.5
Stromverbrauch Stuhl [kWh <sub>el</sub> ]	--	26	--	6	--	3	--	36
Stromverbrauch Stuhl [kWh <sub>el</sub> /m <sup>2</sup> ]	--	1.8	--	0.4	--	0.2	--	2.4
Stromverbrauch Vent [kWh <sub>el</sub> ]	--	0	--	1	--	3	--	5
Stromverbrauch Vent [kWh <sub>el</sub> /m <sup>2</sup> ]	--	0.0	--	0.1	--	0.2	--	0.3

Tabelle 7-13: Heizwärme- (HWB) und Kühlbedarf (KB) des adaptiven Reglers (BCL34) und der Variante mit Stellwand, Bürostuhl, Ventilator (BCL34\_ThW\_Stuhl\_Vent) eines Büros mit 15 m<sup>2</sup> Fläche für den oberen Sollwert von TU = 30 °C für Übergang und Sommer, Stromverbrauch der Stellwand, des Bürostuhls und des Ventilators, \*Reduktion gegenüber BCL34

Vergleich BCL34 und BCL34_ThW_Stuhl_Vent30								
Betrachtungszeitraum	Winter [a, d]]		Übergang [b]]		Sommer [c]]		Jahr	
Gebäuderegler	BCL34	BCL34_*26	BCL34	BCL34_*30	BCL34	BCL34_*30	BCL34	BCL34_*26_30
HWB [kWh/m <sup>2</sup> ]	48	44	5	4	0	0	54	48
KB [kWh/m <sup>2</sup> ]	0	0	7	4	43	35	49	39
Reduktion HWB* (kWh/m <sup>2</sup> )	10.0% (4.8)		19.4% (1.0)		--		10.9% (5.9)	
Reduktion KB* (kWh/m <sup>2</sup> )	--		32.4% (2.1)		19.0% (8.1)		20.9% (10.3)	
Stromverbrauch ThW [kWh <sub>el</sub> ]	--	113	--	30	--	55	--	198
Stromverbrauch ThW [kWh <sub>el</sub> /m <sup>2</sup> ]	--	7.5	--	2.0	--	3.7	--	13.2
Stromverbrauch Stuhl [kWh <sub>el</sub> ]	--	26	--	6	--	6	--	38
Stromverbrauch Stuhl [kWh <sub>el</sub> /m <sup>2</sup> ]	--	1.8	--	0.4	--	0.4	--	2.6
Stromverbrauch Vent [kWh <sub>el</sub> ]	--	0	--	1	--	7	--	8
Stromverbrauch Vent [kWh <sub>el</sub> /m <sup>2</sup> ]	--	0.0	--	0.1	--	0.4	--	0.55

Tabelle 7-14: Heizwärme- (HWB) und Kühlbedarf (KB) des Basisreglers (BCL00) und der Variante mit thermoelektrischer Stellwand, Bürostuhl, Ventilator (BCL34\_ThW\_Stuhl\_Vent) eines Büros mit 15 m<sup>2</sup> Fläche für den oberen Sollwert von TU = 26 °C, Stromverbrauch der Stellwand, des Bürostuhls und des Ventilators, \*Reduktion gegenüber BCL00

Vergleich BCL00 und BCL34_ThW_Stuhl_Vent26								
Betrachtungs- zeitraum	Winter [a), d)]		Übergang [b)]		Sommer [c)]		Jahr	
Gebäuderegler	BCL00	BCL34 _26*	BCL00	BCL34 _26*	BCL00	BCL34 _26*	BCL00	BCL34 _26*
HWB [kWh/m <sup>2</sup> ]	54	44	5	5	0	0	60	48
KB [kWh/m <sup>2</sup> ]	1	0	7	6	43	39	51	45
Reduktion HWB* (kWh/m <sup>2</sup> )	19.3% (10.5)		14.8% (0.8)		--		19.0% (11.3)	
Reduktion KB* (kWh/m <sup>2</sup> )	--		13.3% (0.9)		9.5% (4.1)		11.7% (5.9)	
Stromverbrauch ThW [kWh <sub>el</sub> ]	--	113	--	28	--	31	--	173
Stromverbrauch ThW [kWh <sub>el</sub> /m <sup>2</sup> ]	--	7.5	--	1.9	--	2.1	--	11.5
Stromverbrauch Stuhl [kWh <sub>el</sub> ]	--	26	--	6	--	3	--	36
Stromverbrauch Stuhl [kWh <sub>el</sub> /m <sup>2</sup> ]	--	1.8	--	0.4	--	0.2	--	2.4
Stromverbrauch Vent [kWh <sub>el</sub> ]	--	0	--	1	--	3	--	5
Stromverbrauch Vent [kWh <sub>el</sub> /m <sup>2</sup> ]	--	0.0	--	0.1	--	0.2	--	0.3

Tabelle 7-15: Heizwärme- (HWB) und Kühlbedarf (KB) des Basisreglers (BCL00) und der Variante mit thermoelektrischer Stellwand, Bürostuhl, Ventilator (BCL34\_ThW\_Stuhl\_Vent) eines Büros mit 15 m<sup>2</sup> Fläche für den oberen Sollwert von TU = 30 °C für Übergang und Sommer, Stromverbrauch der Stellwand, des Bürostuhls und des Ventilators, \*Reduktion gegenüber BCL00

Vergleich BCL00 und BCL34_ThW_Stuhl_Vent30								
Betrachtungs- zeitraum	Winter [a), d)]		Übergang [b)]		Sommer [c)]		Jahr	
Gebäuderegler	BCL00	BCL34 _26*	BCL00	BCL34 _30*	BCL00	BCL34 _30*	BCL00	BCL34 _26 _30
HWB [kWh/m <sup>2</sup> ]	54	44	5	4	0	0	60	48
KB [kWh/m <sup>2</sup> ]	1	0	7	4	43	35	51	39
Reduktion HWB* (kWh/m <sup>2</sup> )	19.3% (10.5)		20.2% (1.1)		--		19.6% (11.7)	
Reduktion KB* (kWh/m <sup>2</sup> )	--		31.4% (2.0)		20.4% (8.9)		23.3% (11.9)	
Stromverbrauch ThW [kWh <sub>el</sub> ]	--	113	--	30	--	55	--	198
Stromverbrauch ThW [kWh <sub>el</sub> /m <sup>2</sup> ]	--	7.5	--	2.0	--	3.7	--	13.2
Stromverbrauch Stuhl [kWh <sub>el</sub> ]	--	26	--	6	--	6	--	38
Stromverbrauch Stuhl [kWh <sub>el</sub> /m <sup>2</sup> ]	--	1.8	--	0.4	--	0.4	--	2.6
Stromverbrauch Vent [kWh <sub>el</sub> ]	--	0	--	1	--	7	--	8
Stromverbrauch Vent [kWh <sub>el</sub> /m <sup>2</sup> ]	--	0.0	--	0.1	--	0.4	--	0.55

## 7.6.2 BCL34 / BCL34\_Stuhl\_Vent

Dieser Abschnitt beschreibt die Interaktion der adaptiven Regler-Variante mit dem Bürostuhl mit Heiz- und Kühlfunktion und zusätzlichem Ventilator. Die Simulationsergebnisse des adaptiven Reglers (BCL34) werden den Simulationsergebnissen der Variante mit dem Bürostuhl und Ventilator (BCL34\_Stuhl\_Vent), nachfolgend auch Variante (BCL34\_\*) genannt, gegenübergestellt. Für die Übergangs- und Sommerzeit wird zusätzlich zum Regler mit der oberen Sollwerttemperatur von 26 °C (BCL34\_\*26) ein Vergleich mit einem erhöhten oberen Sollwert von TU = 30 °C durchgeführt (BCL34\_\*30).

### Sollwerttemperatur TU/TL und operative Temperatur $T_{op}$

Auf den folgenden Seiten werden die Diagramme der Sollwertadaption des adaptiven Reglers (BCL34) und der Variante mit thermoelektrischer Heiz- und Kühlwand, Bürostuhl und dem Ventilator (BCL34\_\*) gezeigt.

Abbildung 7-16a zeigt die Sollwertadaption des unteren Sollwertes TL der beiden Regler während der Simulationsperiode vom 1. Januar bis zum 15. März. Die Variante mit den dezentralen Systemen (BCL34\_\*) zeigt durchgehend niedrigere Sollwerte als der adaptive Regler (BCL34). Die Sollwerte der Variante liegen oft zwischen 0,3 bis 0,4 K niedriger im Vergleich zum adaptiven Regler. Dies resultiert in einer niedrigeren operativen Temperatur. Die operative Temperatur ( $T_{op}$ ) der Variante (BCL34\_\*) liegt gelegentlich um 0,5 K unter der des adaptiven Reglers (BCL34) (Abbildung 7-17a).

Es zeigt sich, dass die Variante BCL34\_\*26 während der Simulationsperiode vom 15. März bis zum 15. Mai für den unteren Sollwert TL in den meisten Fällen niedrigere Temperaturen zulässt und für den oberen Sollwert TU höhere Temperaturen (Abbildung 7-16b) im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34). Dadurch liegen mit der Variante (BCL34\_\*) vor allem gegen Ende der Simulationsperiode deutlich höhere operative Temperaturen gegenüber dem adaptiven Regler (BCL34) vor (Abbildung 7-17b). Bei der Variante mit dem erhöhten oberen Sollwert (BCL34\_\*30) liegt der obere Sollwert TU deutlich höher im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34) und zur Variante BCL34\_\*26. Dies zeigt sich auch bei den operativen Temperaturen, die für die Variante BCL34\_\*30 im Vergleich zu BCL34\_\*26 und BCL34 höhere Werte erreichen. Die beiden adaptiven Varianten (BCL34\_\*) erlauben niedrigere untere Sollwerte. Dies äußert sich auch in den operativen Temperaturen zu Beginn der Simulationsperiode.

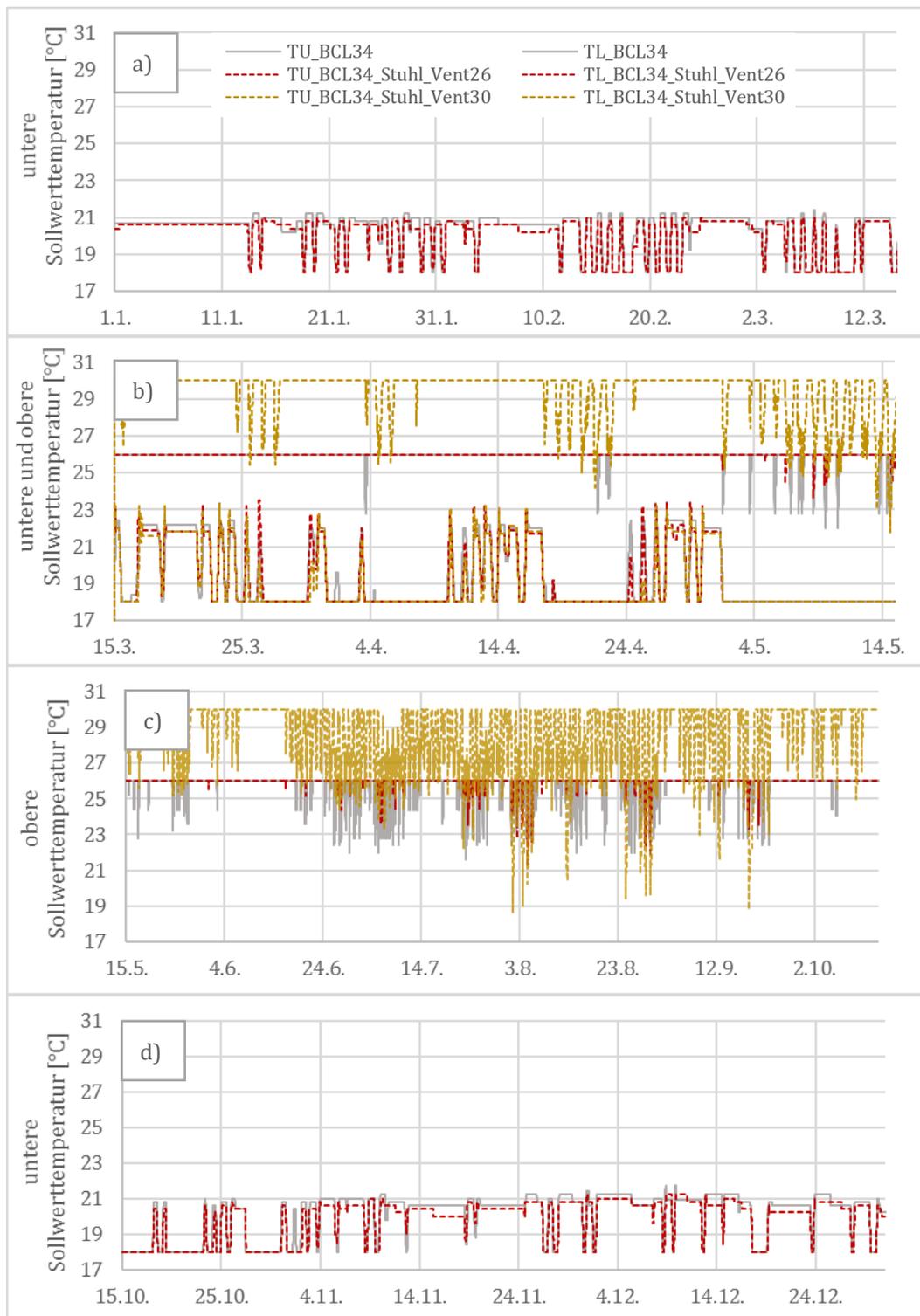


Abbildung 7-16: Heiz- (TL) und Kühlsollwert (TU) des adaptiven Reglers (BCL34) und der Variante mit dem Bürostuhl und Ventilator (BCL34\_Stuhl\_Vent\*) während der Simulationsperiode vom a) 1. Januar bis 15. März, b) 15. März bis 15. Mai, c) 15. Mai bis 15. Oktober, d) 15. Oktober bis 31. Dezember, zusätzlich Variante mit erhhertem oberen Sollwert von 30 °C für die Übergangs- und Sommerzeit

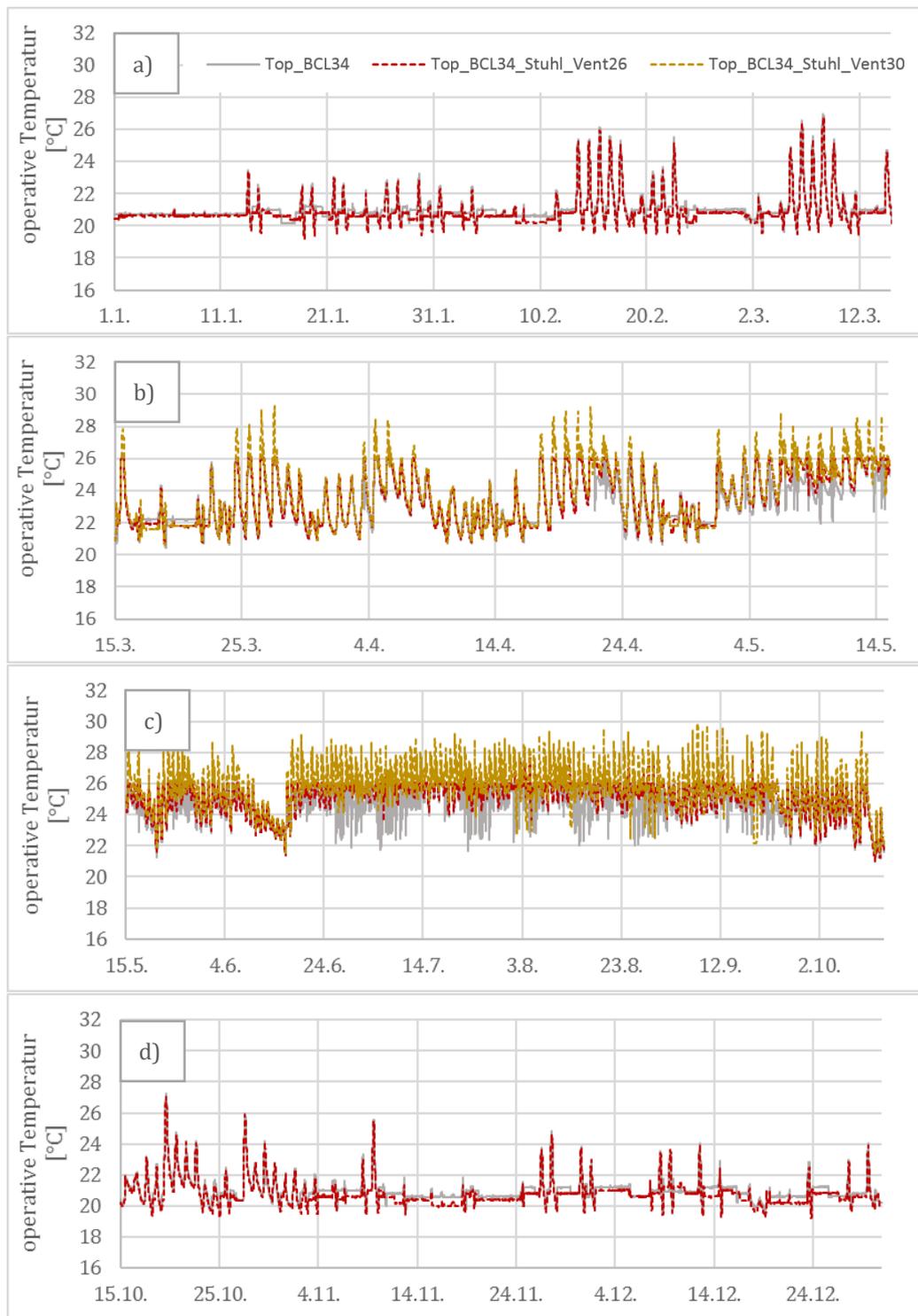


Abbildung 7-17: Operative Temperatur ( $T_{op}$ ) des adaptiven Gebäudereglers ( $T_{op\_BCL34}$ ) und der Variante mit Bürostuhl und Ventilator ( $BCL34\_ThW\_Stuhl\_Vent^*$ ) während der Simulationsperiode vom a) 1. Januar bis 15. März, b) 15. März bis 15. Mai, c) 15. Mai bis 15. Oktober, d) 15. Oktober bis 31. Dezember, Variante mit erhöhtem oberen Sollwert von 30 °C für die Übergangs- und Sommerzeit

Während der Simulationsperiode vom 15. Mai bis zum 15. Oktober (Abbildung 7-16c) liegt die obere Sollwerttemperatur der Variante mit beiden dezentralen Systemen BCL34\_\*26 deutlich über der Sollwerttemperatur des adaptiven Reglers (BCL34). In Folge liegt die operative Temperatur ( $T_{op}$ ) der Variante mit dezentralen Systemen

(BCL34\_\*) in den meisten Fällen über der des adaptiven Reglers ohne dezentrale Systeme (BCL34) (Abbildung 7-17c). Beim Vergleich der Variante mit erhöhtem Sollwert (BCL34\_\*30) wird der obere Sollwert noch einmal deutlich gesteigert, was sich auch in den operativen Temperaturen bemerkbar macht. Gleichzeitig, kommen vereinzelt Tage vor, an denen die obere Sollwerttemperatur deutlich unter der des adaptiven Reglers (BCL34) und der Variante BCL34\_\*26 geregelt wird.

In der Simulationsperiode vom 15. Oktober bis zum 31. Dezember liegt die untere Sollwerttemperatur der Variante (BCL34\_\*) unter der des adaptiven Reglers (BCL34). Die operative Temperatur ( $T_{op}$ ) der Variante (BCL34\_\*) liegt als Folge der Sollwertadaptation (Abbildung 7-16d) während dieser Zeit immer leicht unter der des adaptiven Reglers (BCL34) (Abbildung 7-17d).

### Globale Behaglichkeit

Abbildung 7-18a zeigt die Werte der globalen Behaglichkeit während der Simulationsperiode vom 1. Januar bis zum 15. März. Bei beiden Reglern liegt der Median im Bereich von 0,3. Der Interquartilsbereich der Variante (BCL34\_\*) ist komprimierter und das untere Quartil liegt im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34) minimal höher. Die Maximalwerte von BCL34 liegen bei 1,2, die der Variante BCL34\_\* bei 1,3. Die Häufigkeitsverteilung (Histogramme Anhang C) zeigt, dass der adaptive Regler mit den dezentralen Systemen (BCL34\_\*) weniger negative Werte aufweist als der adaptive Regler (BCL34). Eine deutliche Steigerung der Werte ist im Bereich 0,2 bis 0,4 im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34) möglich.

Während der Simulationsperiode vom 15. März bis zum 15. Mai (Abbildung 7-18b) unterscheiden sich die Interquartilsbereiche der globalen Behaglichkeit. Der Interquartilsbereich der Variante BCL34\_\*26 liegt niedriger und ragt bis in den negativen Bereich (-0,3) im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34) (0,2). Die Variante mit erhöhtem oberem Sollwert von  $TU = 30\text{ °C}$  (BCL34\_\*30) zeigt einen ähnlichen Interquartilsbereich wie der adaptive Regler (BCL34). Der Interquartilsbereich beginnt bei 0,1. Der Median liegt bei allen Regler-Varianten im positiven Bereich. Bei den Varianten liegt der Median bei 0,4 und im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34) um 0,1 niedriger (BCL34\_\*26) und um 0,1 höher (BCL34\_\*30). Die Häufigkeitsverteilung (Histogramme Anhang C) zeigt, dass eine Abnahme der Werte für die Variante BCL34\_\*26 im Vergleich zu BCL34 im Bereich von -0,6 bis 0 und von 0,2 bis 0,6 sowie eine minimale Abnahme im Bereich von 1,2 bis 1,4 erfolgte. Im Bereich von 0 bis 1,2 und 0,6 bis 1,2 stiegen die Behaglichkeitswerte an.

Vergleicht man die Variante BCL34\_\*30 mit BCL34\_\*26 ist eine Abnahme der Werte im Bereich von 0,2 bis 0,4 und 0,8 bis 1,2 zu beobachten. Eine Zunahme der Behaglichkeitswerte erfolgt im negativen Bereich von -1,6 bis 0,2 und von 0,6 bis 0,8 sowie minimal im Bereich von 1,2 bis 1,4.

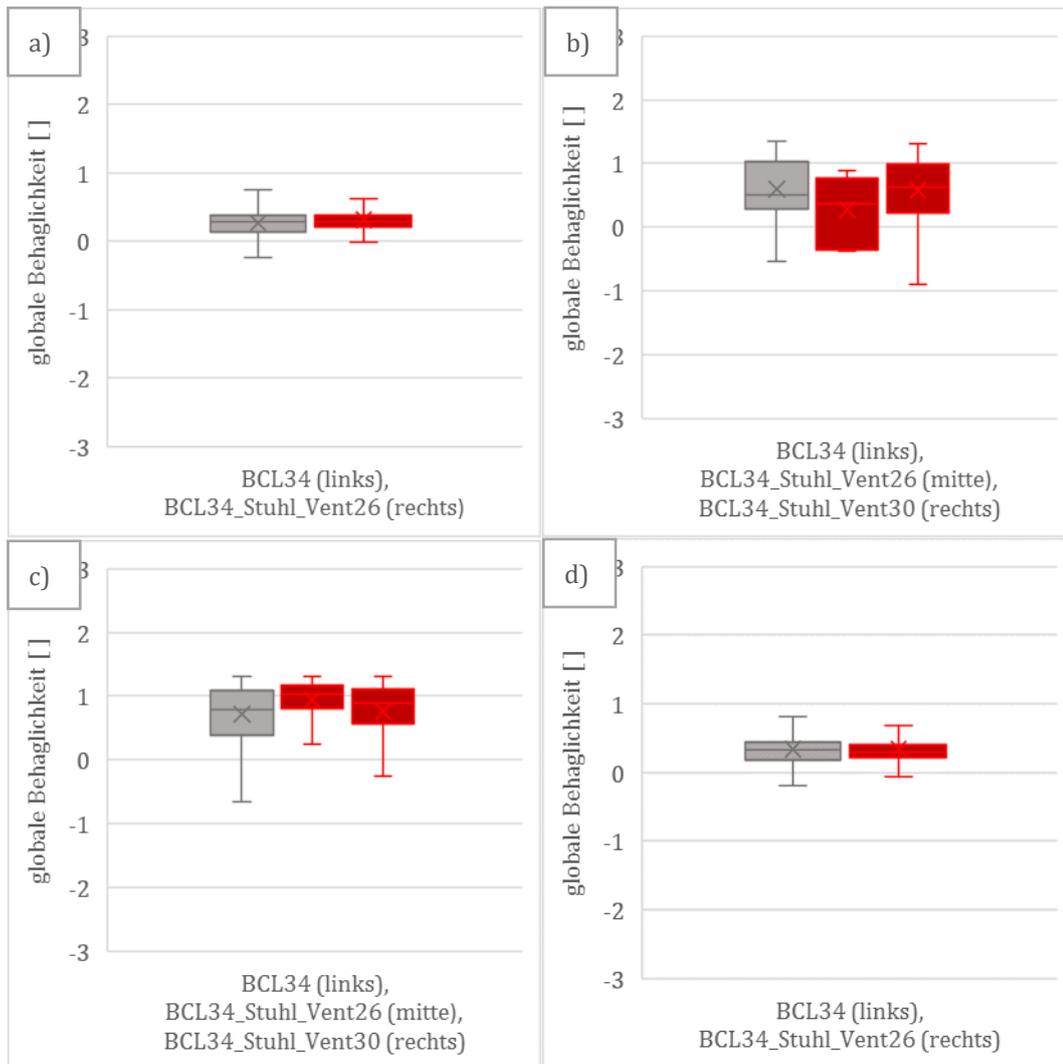


Abbildung 7-18: Globale Behaglichkeit des adaptiven Reglers (BCL34) und der Variante mit Bürostuhl und Ventilator (BCL34\_Stuhl\_Vent) für die Simulationsperiode vom a) 1. Januar bis zum 15. März, b) 15. März bis 15. Mai, c) 15. Mai bis 15. Oktober, d) 15. Oktober bis 31. Dezember, zusätzlich Variante mit erhöhtem oberen Sollwert von 30 °C für die Übergangs- und Sommerzeit

Es zeigt sich, dass die globale Behaglichkeit aller Regler-Varianten während der Simulationsperiode vom 15. Mai bis zum 15. Oktober (Abbildung 7-18c) überwiegend im positiven Bereich liegt. Der Interquartilsbereich des adaptiven Reglers (BCL34) liegt im Bereich von 0,5 bis 1,1. Die Interquartilsbereiche der Varianten (BCL34\_\*) liegen höher im Bereich von 0,8 bis 1,2 (BCL34\_\*26) und im Bereich von 0,6 bis 1,1 (BCL34\_\*30). Die unteren Whisker von BCL34\_\* liegen mit 0,2 (BCL34\_\*26) und -0,2 (BCL34\_\*30) über dem Whisker von BCL34 der bis zu einem Wert von -0,8 reicht. Die Maximalwerte liegen für alle Regler bei 1,2. Die Häufigkeitsverteilung (Histogramme Anhang C) zeigt gegenüber dem adaptiven Regler (BCL34) eine deutliche Verschiebung der unteren Behaglichkeitswerte im Bereich von -0,4 bis 0,6 (Abnahme) zu 1 bis 1,4 (Zunahme).

Vergleicht man die Variante BCL34\_\*30 mit der Variante BCL34\_\*26, kommt es zu einer Abnahme der Werte im Bereich von 0,8 bis 1,4 und zu einer Zunahme der Werte im Bereich von 0,6 bis 0,8 für die Variante BCL34\_\*30.

Die globalen Behaglichkeitswerte liegen während der Simulationsperiode vom 15. Oktober bis zum 31. Dezember für die beiden Regler BCL34 und BCL34\_\* gleichauf (Abbildung 7-18d). Der negative Whisker der Variante (BCL34\_\*) liegt um 0,1 über dem des adaptiven Reglers (BCL34). Die Maximalwerte liegen bei 1,2 für beide Regler. Die Häufigkeitsverteilung (Histogramme Anhang C) zeigt, dass im Bereich von 0,2 bis 0,4 eine Häufung der Behaglichkeitswerte für die Variante BCL34\_\*26 vorliegt.

### Heizwärme- und Kühlbedarf

Die folgenden Tabellen vergleichen den Heizwärme- (HWB) und Kühlbedarf (KB) der vier Betrachtungszeiträume für Winter, Übergang, Sommer und für ein Jahr. Zusätzlich werden der Stromverbrauch des Bürostuhls mit Heiz- und Kühlfunktion und des Ventilators aufgeführt. Der Stromverbrauch bezieht sich auf einen prototypischen Raum mit 15 m<sup>2</sup> Fläche. Die Winterperiode setzt sich aus den zwei Simulationsperioden vom 1. Januar bis zum 15. März und vom 15. Oktober bis zum 31. Dezember zusammen. Tabelle 7-16 und Tabelle 7-18 vergleichen die Werte der Regler-Variante mit dem oberen Sollwert von TU = 26 °C (BCL34\_\*26), während Tabelle 7-17 und Tabelle 7-19 die Werte mit der Regler-Variante und TU = 30 °C (für Übergang und Sommerzeit) vergleichen.

Während der Winterperiode zeigt die Variante mit den dezentralen Systemen (BCL34\_\*26) im Vergleich zum Basisregler (BCL00) einen um 13,2 % reduzierten Heizenergiebedarf (Tabelle 7-18). Im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34) sind es 3,2 % weniger, die die Variante mit (BCL34\_\*26) benötigt (Tabelle 7-16). Der Anteil des Kühlbedarfs ist sehr gering und wird daher in der Analyse vernachlässigt.

Während der Übergangsphase zeigt die Variante BCL34\_\*26 im Vergleich zum Basisregler (BCL00) eine Reduktion des Heizwärmebedarfs um 4,0 % und die Variante BCL34\_\*30 eine Reduktion um 9,6 % (Tabelle 7-18, Tabelle 7-19). Im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34) kann der Heizwärmebedarf um 3,0 % (BCL34\_\*26) und 8,7 % (BCL34\_\*30) reduziert werden (Tabelle 7-16, Tabelle 7-17). Der Kühlbedarf kann um 11,9 % (BCL34\_\*26) und 29,5 % (BCL34\_\*30) gegenüber dem Basisregler (BCL00) (Tabelle 7-18, Tabelle 7-19) und um 13,2 % (BCL34\_\*26) und 30,5 % (BCL34\_\*30) gegenüber dem adaptiven Regler (BCL34) reduziert werden (Tabelle 7-16, Tabelle 7-17).

Während der Sommerperiode zeigt die Variante BCL34\_\*26 eine Reduktion des Kühlbedarfs von 9,6 %, die Variante BCL34\_\*30 eine Reduktion von 18,8 % im Vergleich zu BCL00 (Tabelle 7-18, Tabelle 7-19). Gegenüber BCL34 (Tabelle 7-16, Tabelle 7-17) kann eine Reduktion von 8,0 % (BCL34\_\*26) und 17,4 % (BCL34\_\*30) erreicht werden. Der Anteil des Heizwärmebedarfs wird während der Sommermonate vernachlässigt, da er sehr gering ist.

Im Jahresverlauf zeigt die Variante mit den dezentralen Systemen (BCL34\_\*) positive Ergebnisse im Hinblick auf die Reduktion des Heizwärme- und Kühlbedarfs. BCL34\_\*26 zeigt einen um 12,5 % und BCL34\_\*30 einen um 13,0 % niedrigeren Heizwärmebedarf gegenüber dem Basisregler (BCL00) (Tabelle 7-18, Tabelle 7-19). Im Vergleich zum

adaptiven Regler (BCL34) sind es 3,1 % (BCL34\_\*26) und 3,7 % (BCL34\_\*30) weniger (Tabelle 7-16, Tabelle 7-17). Der Kühlbedarf kann mit der Variante BCL34\_\*26 gegenüber dem Basisregler (BCL00) um 11,5 % und mit der Variante BCL34\_\*30 um 21,6 % gesenkt werden (Tabelle 7-18, Tabelle 7-19). Gegenüber dem adaptiven Regler kann der Kühlbedarf um 8,8 % (BCL34\_\*26) und 19,2 % (BCL34\_\*30) reduziert werden (Tabelle 7-16, Tabelle 7-17).

### Zusammenfassung

Die erhöhte Luftgeschwindigkeit im Gesichtsbereich kann die globale Behaglichkeit steigern und in Folge die Adaption des oberen Sollwertes TU der zentralen Heiz- und Kühlanlage positiv beeinflussen. Somit führt die Nutzung des modellierten Ventilators, innerhalb der Varianten des adaptiven Reglers (BCL34\_\*), zu einer deutlichen Reduktion des Kühlbedarfs während der Übergangszeit und der Sommerzeit im Vergleich zum Basisregler (BCL00) sowie im Vergleich zum adaptiven Regler (BCL34).

Durch die Hinzunahme des Ventilators in die Regelungslogik, war es auch möglich den oberen Sollwert zu erhöhen und eine Sollwerterweiterung auf 30 °C durchzuführen. Die Behaglichkeitswerte konnten dabei sogar während der Sommermonate gesteigert und überwiegend im positiven Behaglichkeitsbereich gehalten werden.

Tabelle 7-16: Heizwärme- (HWB) und Kühlbedarf (KB) des adaptiven Reglers (BCL34) und der Variante mit Bürostuhl und Ventilator (BCL34\_Stuhl\_Vent) eines Büros mit 15 m<sup>2</sup> Fläche für den oberen Sollwert von TU = 26 °C, zusätzlich Stromverbrauch des Bürostuhls mit Heiz- und Kühlfunktion und Ventilator, \*Reduktion gegenüber BCL34

Vergleich BCL34 und BCL34_Stuhl_Vent26								
Betrachtungs- zeitraum	Winter [a), d)]		Übergang [b)]		Sommer [c)]		Jahr	
Gebäuderegler	BCL34	BCL34 _*26	BCL34	BCL34 _*26	BCL34	BCL34 _*26	BCL34	BCL34 _*26
HWB [kWh/m <sup>2</sup> ]	48	47	5	5	0	0	54	52
KB [kWh/m <sup>2</sup> ]	0	0	7	6	43	39	49	45
Reduktion HWB* (kWh/m <sup>2</sup> )	3.2% (1.5)		3.0% (0.2)		--		3.1% (1.7)	
Reduktion KB* (kWh/m <sup>2</sup> )	--		13.2% (0.9)		8.0% (3.4)		8.8% (4.3)	
Stromverbrauch Stuhl [kWh <sub>el</sub> ]	--	38	--	9	--	3	--	50
Stromverbrauch Stuhl [kWh <sub>el</sub> /m <sup>2</sup> ]	--	2.5	--	0.6	--	0.2	--	3.3
Stromverbrauch Vent [kWh <sub>el</sub> ]	--	0	--	1	--	3	--	5
Stromverbrauch Vent [kWh <sub>el</sub> /m <sup>2</sup> ]	--	0.0	--	0.1	--	0.2	--	0.3

Tabelle 7-17: Heizwärme- (HWB) und Kühlbedarf (KB) des adaptiven Reglers (BCL34) und der Variante mit Bürostuhl und Ventilator (BCL34\_Stuhl\_Vent) eines Büros mit 15 m<sup>2</sup> Fläche für den oberen Sollwert von TU = 30 °C (Übergang und Sommer), zusätzlich Stromverbrauch des Bürostuhls mit Heiz- und Kühlfunktion und Ventilator, \*Reduktion gegenüber BCL34

Vergleich BCL34 und BCL34_Stuhl_Vent30								
Betrachtungs- zeitraum	Winter [a),d)]		Übergang [b)]		Sommer [c)]		Jahr	
Gebäuderegler	BCL34	BCL34 _*26	BCL34	BCL34 _*30	BCL34	BCL34 _*30	BCL34	BCL34 _*26_ 30
HWB [kWh/m <sup>2</sup> ]	48	47	5	5	0	0	54	52
KB [kWh/m <sup>2</sup> ]	0	0	7	5	43	35	49	40
Reduktion HWB* (kWh/m <sup>2</sup> )	3.2% (1.5)		8.7% (0.5)		--		3.7% (2.0)	
Reduktion KB* (kWh/m <sup>2</sup> )	--		30.5% (2.0)		17.4% (7.4)		19.2% (9.5)	
Stromverbrauch Stuhl [kWh <sub>el</sub> ]	--	38	--	9	--	6	--	52
Stromverbrauch Stuhl [kWh <sub>el</sub> /m <sup>2</sup> ]	--	2.5	--	0.6	--	0.4	--	3.5
Stromverbrauch Vent [kWh <sub>el</sub> ]	--	0	--	1	--	6	--	8
Stromverbrauch Vent [kWh <sub>el</sub> /m <sup>2</sup> ]	--	0.0	--	0.1	--	0.4	--	0.5

Tabelle 7-18: Heizwärme- (HWB) und Kühlbedarf (KB) des Basisreglers (BCL00) und der Variante mit Bürostuhl und Ventilator (BCL34\_Stuhl\_Vent) eines Büros mit 15 m<sup>2</sup> Fläche für den oberen Sollwert von TU = 26 °C, zusätzlich Stromverbrauch des Bürostuhls mit Heiz- und Kühlfunktion und Ventilator, \*Reduktion gegenüber BCL00

Vergleich BCL00 und BCL34_Stuhl_Vent26								
Betrachtungs- zeitraum	Winter [a,d)]		Übergang [b)]		Sommer [c)]		Jahr	
Gebäuderegler	BCL00	BCL34 _*26	BCL00	BCL34 _*26	BCL00	BCL34 _*26	BCL00	BCL34 _*26
HWB [kWh/m <sup>2</sup> ]	54	47	5	5	0	0	60	52
KB [kWh/m <sup>2</sup> ]	1	0	7	6	43	39	51	45
Reduktion HWB* (kWh/m <sup>2</sup> )	13.2% (7.1)		4.0% (0.2)		--		12.5% (7.5)	
Reduktion KB* (kWh/m <sup>2</sup> )	--		11.9% (0.8)		9.6% (4.2)		11.5% (5.9)	
Stromverbrauch Stuhl [kWh <sub>el</sub> ]	--	38	--	9	--	3	--	50
Stromverbrauch Stuhl [kWh <sub>el</sub> /m <sup>2</sup> ]	--	2.5	--	0.6	--	0.2	--	3.3
Stromverbrauch Vent [kWh <sub>el</sub> ]	--	0	--	1	--	3	--	5
Stromverbrauch Vent [kWh <sub>el</sub> /m <sup>2</sup> ]	--	0.0	--	0.1	--	0.2	--	0.3

Tabelle 7-19: Heizwärme- (HWB) und Kühlbedarf (KB) des Basisreglers (BCL00) und der Variante mit Bürostuhl und Ventilator (BCL34\_Stuhl\_Vent) eines Büros mit 15 m<sup>2</sup> Fläche für den oberen Sollwert von TU = 30 °C (Übergang und Sommer), zusätzlich Stromverbrauch des Bürostuhls mit Heiz- und Kühlfunktion und Ventilator, \*Reduktion gegenüber BCL00

Vergleich BCL00 und BCL34_Stuhl_Vent30								
Betrachtungs- zeitraum	Winter [a,d)]		Übergang [b)]		Sommer [c)]		Jahr	
Gebäuderegler	BCL00	BCL34 _*26	BCL00	BCL34 _*30	BCL00	BCL34 _*30	BCL00	BCL34 _*26 _30
HWB [kWh/m <sup>2</sup> ]	54	47	5	5	0	0	60	52
KB [kWh/m <sup>2</sup> ]	1	0	7	5	43	35	51	40
Reduktion HWB* (kWh/m <sup>2</sup> )	13.2% (7.1)		9.6% (0.5)		--		13.0% (7.8)	
Reduktion KB* (kWh/m <sup>2</sup> )	--		29.5% (1.9)		18.8% (8.1)		21.6% (11.0)	
Stromverbrauch Stuhl [kWh <sub>el</sub> ]	--	38	--	9	--	6	--	52
Stromverbrauch Stuhl [kWh <sub>el</sub> /m <sup>2</sup> ]	--	2.5	--	0.6	--	0.4	--	3.5
Stromverbrauch Vent [kWh <sub>el</sub> ]	--	0	--	1	--	6	--	8
Stromverbrauch Vent [kWh <sub>el</sub> /m <sup>2</sup> ]	--	0.0	--	0.1	--	0.4	--	0.5

## 8 Diskussion

Durch die Entwicklung des adaptiven Reglers (BCL34) und der Regler-Varianten mit dezentralen Systemen (BCL34\_\*) wurde es ermöglicht, die thermische Behaglichkeit sowie eine Potenzialabschätzung im Hinblick auf mögliche Energieeinsparungen vorherzusagen.

Mithilfe der durchgeführten Simulationen wurde gezeigt, dass die angestrebten Ziele des adaptiven Gebäudereglers, nämlich die thermische Behaglichkeit aufrecht zu erhalten und gleichzeitig einen energiesparenden Gebäudebetrieb zu unterstützen, erreicht werden konnten.

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse bezüglich der Kriterien „globale Behaglichkeit“, „Heizwärme- und Kühlbedarf“, „Stromverbrauch der dezentralen Systeme“ und „Benötigte Endenergie zum Heizen und Kühlen“ zusammenfassend für jeden Simulationszeitraum dargestellt und diskutiert. Die Simulationszeiträume teilen sich in die Winterzeit (15.10 - 15.03), die Übergangszeit (15.03 - 15.05) und die Sommerzeit (15.05 - 15.10) auf.

Zur Bewertung der Endenergie wurde eine reversible Wärmepumpe berücksichtigt. Für diese wurde jeweils ein COP-Wert („Coefficient of Performance“) mit  $COP_{\text{Heiz}} = 3$  und  $COP_{\text{Kühl}} = 2$  angesetzt [141]. Zusätzlich wurde die Nutzung der dezentralen Heiz- und Kühlsysteme energetisch berücksichtigt.

Die Ergebnisse werden in einer Synthese diskutiert. Anschließend daran werden die in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse mit denen anderer Studien verglichen.

In diesem Kapitel bezieht sich BCL34\_\* auf alle zuvor vorgestellten Regler-Varianten sowohl mit einem dezentralen System als auch einer Kombination aus verschiedenen dezentralen Systemen.

### 8.1 Winterzeitraum

Der Winterzeitraum setzt sich aus den zwei Simulationsperioden vom 15. Oktober bis 31. Dezember und vom 1. Januar bis zum 15. März zusammen. Die folgenden Diagramme zeigen a) die globale Behaglichkeit, b) den Heizwärme- und Kühlbedarf, c) die Endenergie inklusive der genutzten Energie durch die dezentralen Systeme, d) die Hilfsenergie der genutzten dezentralen Systeme für den Zeitraum vom 15. Oktober bis zum 15. März.

### 8.1.1 Diagramme

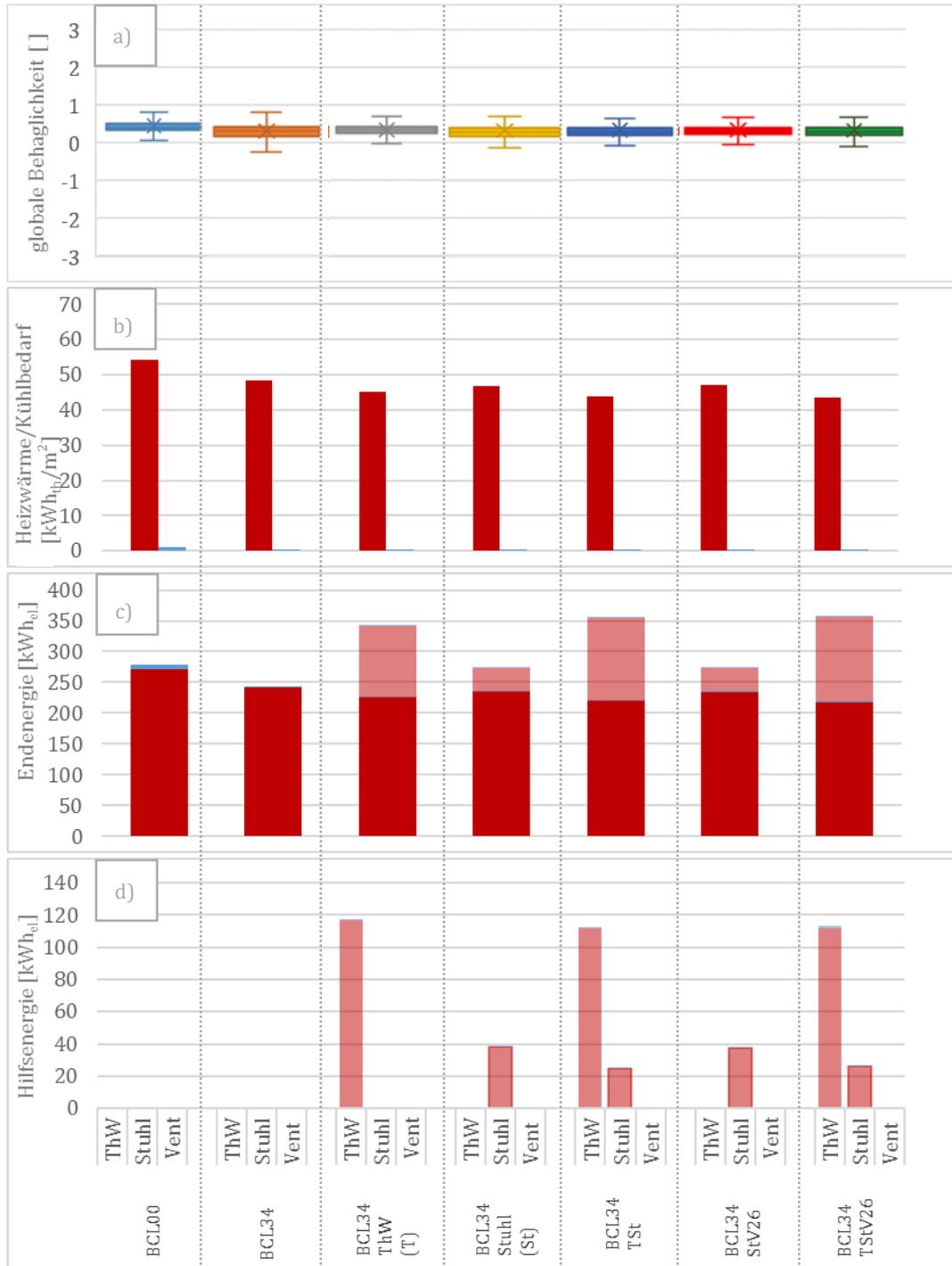


Abbildung 8-1: Winterzeitraum (15.10 – 15.03), a) Verteilung der berechneten Werte der globalen Behaglichkeit (n = 14496), b) Heizwärme- und Kühlbedarf der Gebäudezone, c) Benötigte Endenergie zum Heizen und Kühlen unter Annahme einer reversiblen Wärmepumpe ( $COP_{Heiz} = 3$ ,  $COP_{Kühl} = 2$ ) sowie Hilfsenergie für die Varianten BCL34\_\* d) Stromverbrauch der dezentralen Systeme, Thermoelektrische Stellwand (ThW), Stuhl (St), Ventilator (V),

Legende:

- Co\_BCL00
- Co\_BCL34
- Co\_BCL34\_ThW
- Co\_Stuhl
- Co\_BCL34\_ThW\_Stuhl
- Co\_Stuhl\_Vent26
- Co\_ThW\_Stuhl\_Vent26
- Heizenergie
- Kühlenergie
- HilfsE. Heizen
- HilfsE. Kühlen

### 8.1.2 Globale Behaglichkeit

Abbildung 8-1a zeigt eine Zusammenfassung der Behaglichkeitswerte der Regler-Varianten für den Winterzeitraum in Form eines Boxplot-Diagramms. Für alle Varianten gilt, dass die erzielten Spitzenwerte der globalen Behaglichkeit maximal 1,3 erreichen. Dies ist in der Regelungslogik begründet: Im Behaglichkeitsbereich zwischen 0,5 bis 1,5 erfolgt die „Smoothing“-Bedingung, die den adaptierten Sollwert langsam zurück in Richtung der Anfangssollwerte ( $T_{Li}$ ,  $T_{Ui}$ ) führt. Wird der Heizsollwert ( $T_L$ ) oder der Kühlsollwert ( $T_U$ ) verändert, hat dies einen direkten Einfluss auf die berechnete Behaglichkeit.

Zur besseren Lesbarkeit wurden die Ausreißer, das heißt die Werte, die über den Whiskern mit 1,5-fachen Interquartilsabstand liegen, herausgenommen. Diese Ausreißer konnten nach einem Anstieg der operativen Temperatur  $T_{op}$  auf über 24 °C beobachtet werden, gelegentlich auch bei einem Temperaturabfall von  $T_{op}$  bis unter 20 °C. Dies liegt daran, dass das Manikin während diesem Zeitraum Winterbekleidung trug und es sich bei einem Temperatur-Anstieg auf über 24 °C unbehaglich fühlte. Hier benötigt die Regelungslogik mehrere Zeitschritte, um die Behaglichkeit auf einen positiven Wert zurückzuführen. Bei den Varianten mit dezentralen Systemen können gegenüber dem adaptiven Regler die Ausreißer in den negativen Bereich verringert werden.

Bei allen Varianten mit adaptiven Gebäuderegler (BCL34 bzw. BCL34\_\*) ist zu erkennen, dass der Median sowie der Interquartilsbereich der thermischen Behaglichkeit leicht unter den Werten des Basisreglers BCL00 liegen. Die Unterschiede bewegen sich dabei im Medianbereich zwischen 0,07 bis 0,11 und im Interquartilsbereich zwischen 0,08 bis 0,17.

### 8.1.3 Heizwärme und Kühlbedarf, Stromverbrauch und Endenergie

In Abbildung 8-1b ist der Heizwärme- und Kühlbedarf der verschiedenen Regler-Varianten über den Winterzeitraum zu sehen. Zusätzlich wird die Reduktion des Heizwärmebedarfs gegenüber dem Basisregler BCL00 gezeigt.

Abbildung 8-1d zeigt eine Gegenüberstellung des Stromverbrauchs der dezentralen Systeme innerhalb der Regler-Varianten

Energetisch betrachtet wirkt sich die Nutzung der adaptiven Regler-Varianten mit den dezentralen Systemen BCL34\_\* während der Winterzeit positiv aus. Hier konnte der Heizwärmebedarf mit allen Varianten BCL34 und BCL34\_\* merklich gesenkt werden. Die größten Effekte konnten die Varianten BCL34\_ThW\_Stuhl\_Vent26 und BCL34\_ThW\_Stuhl erzielen, gefolgt von BCL34\_ThW (Abbildung 8-1b). Die Varianten mit Stuhl sowie mit Stuhl und Ventilator zeigen ähnlich hohe Einsparungen. Auch der adaptive Regler BCL34 kann gegenüber dem Basisregler positive Ergebnisse im Hinblick auf eine Einsparung des Heizwärmebedarfs erzielen.

Beim Vergleich des Stromverbrauchs der dezentralen Systeme (Abbildung 8-1d) wird deutlich, dass vor allem die thermoelektrische Stellwand (ThW) viel Strom benötigt. Dies

lässt sich mit ihrer verhältnismäßig hohen elektrischen Leistung erklären. Der Bürostuhl und der Ventilator zeigen in Relation zur thermoelektrischen Stellwand einen sehr geringen Verbrauch.

Daraus ergibt sich, dass die Varianten mit thermoelektrischer Heiz- und Kühlwand (BCL34\_ThW, BCL34\_ThW\_Stuhl, BCL34\_ThW\_Stuhl\_Vent26) mehr Energie gegenüber den Varianten ohne thermoelektrische Stellwand benötigen. Obwohl diese Varianten den Heizwärmebedarf der zentralen Anlage reduzieren können, wird aufgrund des hohen Stromverbrauchs der thermoelektrischen Heiz- und Kühlwand der Endenergiebedarf gegenüber dem Basisregler nicht reduziert (Abbildung 8-1c). Die adaptiven Varianten BCL34, BCL34\_Stuhl sowie BCL34\_Stuhl\_Vent26 weisen gegenüber dem Basisregler BCL00 einen geringeren Energiebedarf auf.

## 8.2 Übergangszeitraum

### 8.2.1 Diagramme

Die folgenden Diagramme zeigen a) die globale Behaglichkeit, b) den Heizwärme- und Kühlbedarf, c) die Endenergie inklusive der genutzten Energie durch die dezentralen Systeme, d) die Hilfsenergie der genutzten dezentralen Systeme für den Zeitraum vom 15. März bis zum 15. Mai.

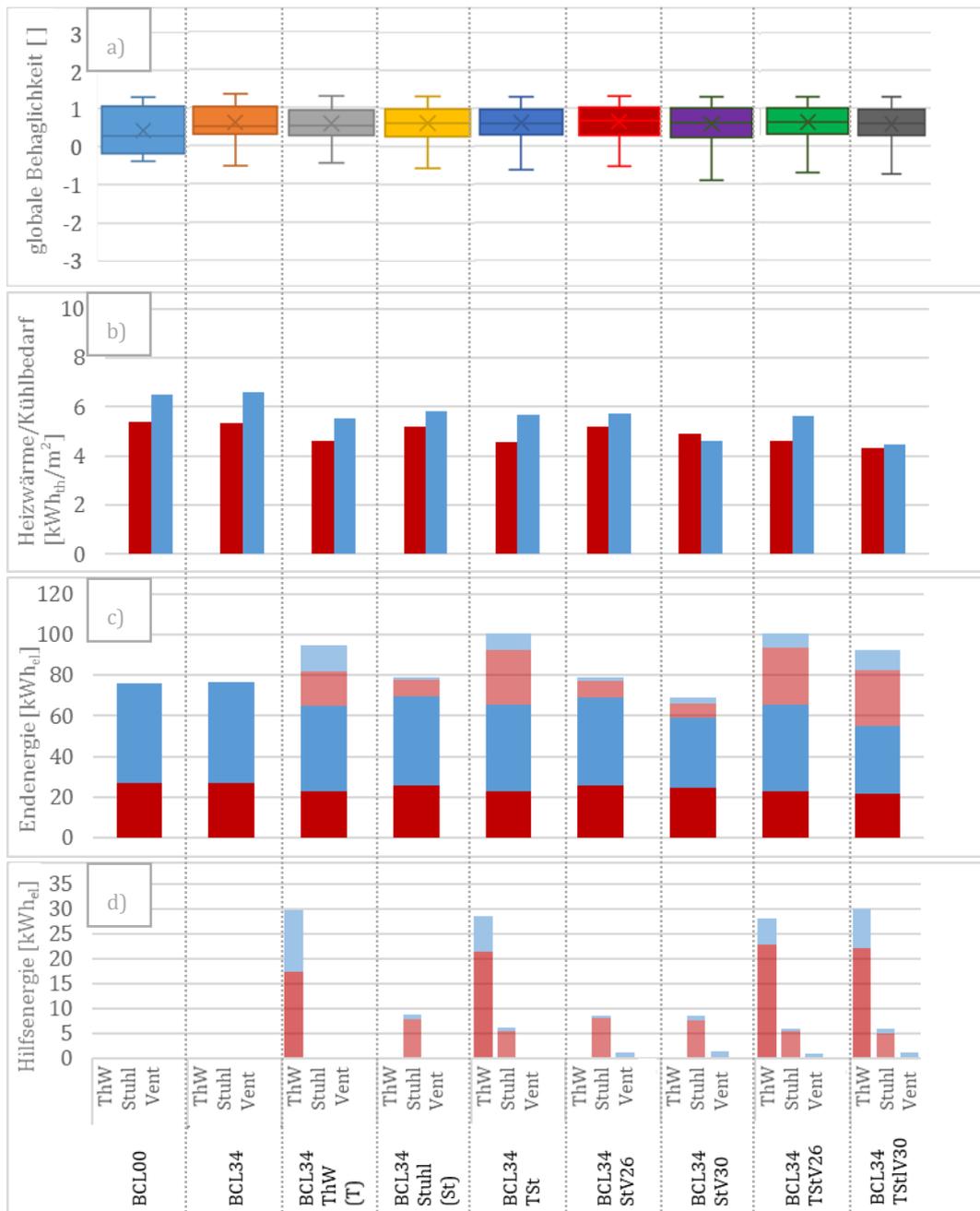
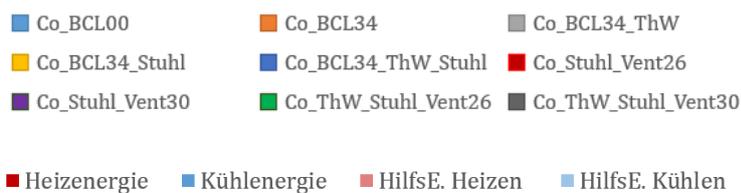


Abbildung 8-2: Übergangsphase (15.03 - 15.05), a) Verteilung der berechneten Werte der globalen Behaglichkeit ( $n = 5856$ ), b) Heizwärmebedarf und Kühlbedarf der Gebäudezone, c) Benötigte Endenergie zum Heizen und Kühlen unter Annahme einer reversiblen Wärmepumpe ( $COP_{Heiz} = 3$ ,  $COP_{Kühl} = 2$ ) sowie Hilfsenergie für die Varianten BCL34\_\* d) Stromverbrauch der dezentralen Systeme, Thermoelektrische Stellwand (ThW), Stuhl (St), Ventilator (V),

Legende:



## 8.2.2 Globale Behaglichkeit

Es ist positiv zu betrachten, dass während des Übergangszeitraums die Mediane sowie die Interquartilsbereiche der thermischen Behaglichkeit für die Varianten mit dem adaptiven Gebäuderegler (BCL34 bzw. BCL34\_\*) über denen des Basisreglers (BCL00) liegen (Abbildung 8-2a). Die Unterschiede bewegen sich im Medianbereich zwischen 0,24 bis 0,47 und im Interquartilsbereich zwischen 0,43 bis 0,48. Während der Interquartilsbereich des Basisreglers minimal im negativen Bereich liegt, bleiben die Interquartilsbereiche aller Varianten des adaptiven Reglers im positiven Bereich. Die Minimalwerte des Basisreglers (BCL00) liegen über denen der Varianten (BCL34, BCL34\_\*). Die Minimalwerte der Varianten (BCL34 und BCL34\_\*) liegen dabei 0,1 bis 0,3 unter denen des Basisreglers (BCL00). Die Maximalwerte aller adaptiven Varianten (BCL34, BCL34\_\*) liegen minimal über dem Maximalwert des Basisreglers (BCL00) von 1,3.

## 8.2.3 Heizwärme- und Kühlbedarf, Stromverbrauch und Endenergie

Während dieses Übergangszeitraums benötigt der adaptive Regler (BCL34) im Vergleich zum Basisregler (BCL00) minimal mehr Kühlenergie. Allerdings kann mit allen Varianten (BCL34\_\*) sowohl der Heizwärme- als auch der Kühlbedarf reduziert werden. Die größten Einsparungen des Heizwärme- und Kühlenergiebedarfs zeigt der Regler BCL34\_ThW\_Stuhl\_Vent30. Dies erklärt sich durch die Sollwertanpassung auf einen höheren Sollwert von 30 °C (Abbildung 8-2b).

Bei der Betrachtung des Stromverbrauchs der dezentralen Systeme (Abbildung 8-2d) sowie des Endenergiebedarfs (Abbildung 8-2c) fällt auf, dass die Varianten (BCL34\_\*) bezüglich der Wärme- und Kühlfunktion unterschiedlich genutzt wurden. Auch während diesem Übergangszeitraums zeigt die thermoelektrische Stellwand den höchsten Stromverbrauch. Auffallend ist dabei, dass der Stromverbrauch der thermoelektrischen Stellwand bei Nutzung zusätzlicher dezentraler Systeme (BCL34\_ThW\_Stuhl, BCL34\_ThW\_Stuhl\_Vent) weiter ansteigt. Dagegen zeigt der Stromverbrauch des Bürostuhls mit Heiz- und Kühlfunktion bei den kombinierten Varianten mit den anderen dezentralen Systemen entweder einen ähnlich hohen Stromverbrauch (BCL34\_Stuhl\_Vent) oder einen reduzierten (BCL34\_ThW\_Stuhl, BCL34\_ThW\_Stuhl\_Vent). Hier scheint es so zu sein, dass die Heizfunktion des Stuhls reduziert wird, wenn gleichzeitig die thermoelektrische Stellwand genutzt wird.

Bei alleiniger Nutzung der thermoelektrischen Stellwand ist der Stromverbrauch sowohl bei Heizen als auch Kühlen ähnlich hoch. Bei Hinzunahme der anderen dezentralen Systeme überwiegt der Stromverbrauch durch Heizen. In diesem Fall wurden die thermoelektrische Stellwand und der Stuhl überwiegend zum Heizen genutzt. Hier gleichen die beiden Systeme die Ventilation des Kopfes aus und stellen lokale ungleiche Empfindungen her (Alliesthesia). Durch die Nutzung des Ventilators wird das lokale Empfinden des Kopfes so stark beeinträchtigt, sodass die thermoelektrische Stellwand im oberen Bereich zum Heizen genutzt werden muss (siehe Anhang D).

Beim Vergleich des Endenergieverbrauchs fällt auf, dass viele der adaptiven Varianten gegenüber dem Basisregler mehr Endenergie nutzen. Vor allem die Varianten mit thermoelektrischer Stellwand fallen mit einem erhöhten Endenergieverbrauch negativ auf, wohingegen die Varianten mit Stuhl positiv herausstechen.

Den höchsten Verbrauch zeigen die Varianten BCL34\_ThW\_Stuhl\_Vent. Hier wird zusätzlich zum Heizwärme- und Kühlbedarf der zentralen Anlage durch die thermoelektrische Heiz- und Kühlwand viel Energie beim Heizen verbraucht. Der Endenergiebedarf im Verhältnis zum Basisregler ist somit auch am höchsten (Abbildung 8-2c).

Neben dem adaptiven Regler BCL34 zeigen die Varianten mit Stuhl den geringsten Verbrauch. Diese Varianten (BCL34\_Stuhl, BCL34\_Stuhl\_Vent26) benötigen nur minimal mehr Endenergie im Vergleich zum Basisregler (BCL00). Die Variante mit Stuhl und Ventilator und einem erhöhten oberen Sollwert (BCL34\_Stuhl\_Vent30) zeigt die größten Einsparungen bei der Endenergie, da der Ventilator sowie der Stuhl relativ wenig Strom nutzen.

### 8.3 Sommerzeitraum

Die folgenden Diagramme zeigen a) die globale Behaglichkeit, b) den Heizwärme- und Kühlbedarf, c) die Endenergie inklusive der genutzten Energie durch die dezentralen Systeme, d) die Hilfsenergie der genutzten dezentralen Systeme für den Zeitraum vom 15. Mai bis zum 15. Oktober.

### 8.3.1 Diagramme

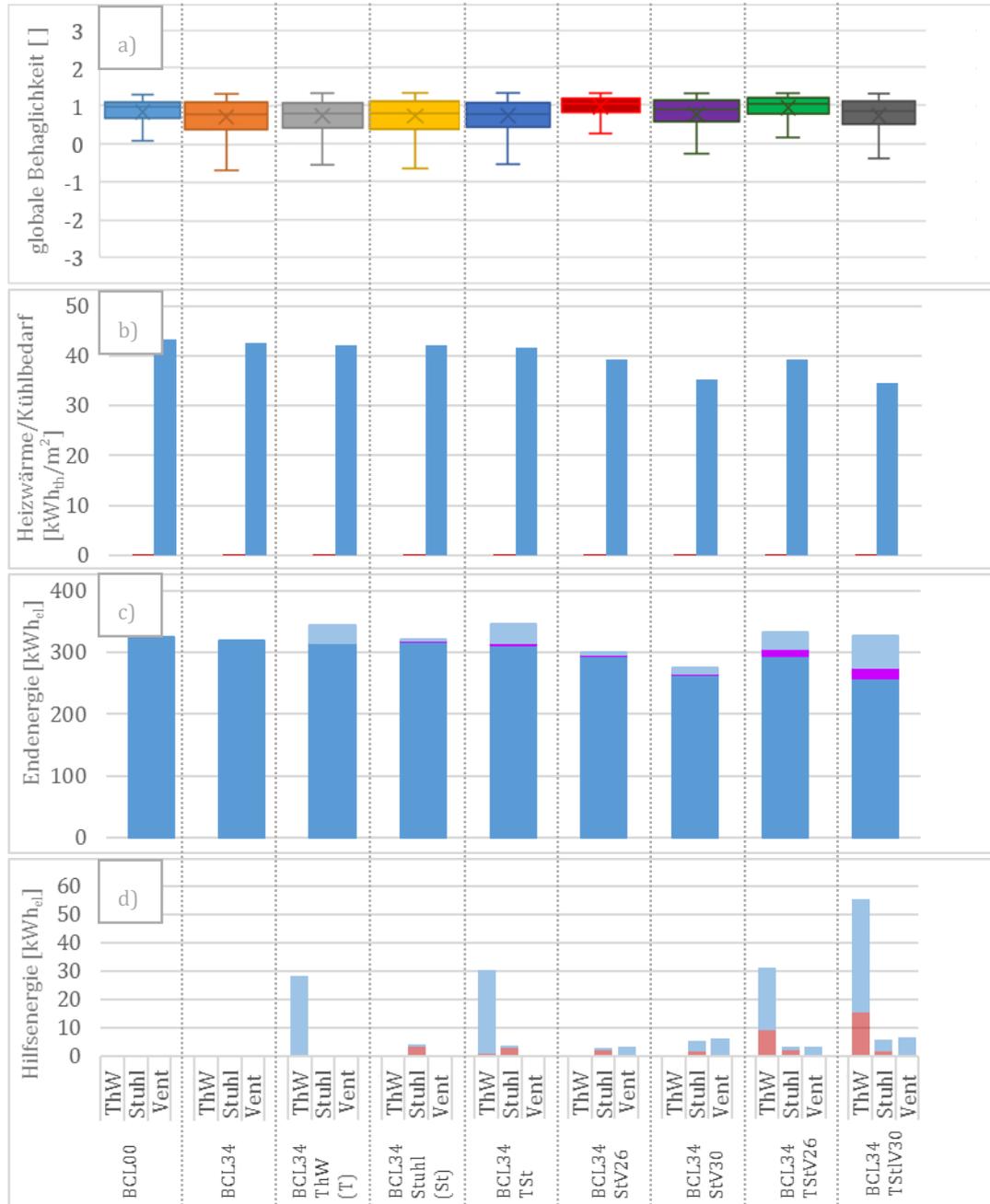


Abbildung 8-3: Sommerzeitraum (15.05 – 15.10), a) Verteilung der berechneten Werte der globalen Behaglichkeit ( $n = 14688$ ), b) Heizwärmebedarf und Kühlbedarf der Gebäudezone, c) Benötigte Endenergie zum Heizen und Kühlen unter Annahme einer reversiblen Wärmepumpe ( $COP_{\text{Heiz}} = 3$ ,  $COP_{\text{Kühl}} = 2$ ) sowie Hilfsenergie für die Varianten BCL34\_\* d) Stromverbrauch der dezentralen Systeme, Thermoelektrische Stellwand (ThW), Stuhl (St), Ventilator (V),

Legende:

<span style="color: blue;">■</span> Co_BCL00	<span style="color: orange;">■</span> Co_BCL34	<span style="color: gray;">■</span> Co_BCL34_ThW	
<span style="color: yellow;">■</span> Co_BCL34_Stuhl	<span style="color: blue;">■</span> Co_BCL34_ThW_Stuhl	<span style="color: red;">■</span> Co_Stuhl_Vent26	
<span style="color: purple;">■</span> Co_Stuhl_Vent30	<span style="color: green;">■</span> Co_ThW_Stuhl_Vent26	<span style="color: black;">■</span> Co_ThW_Stuhl_Vent30	
<span style="color: red;">■</span> Heizenergie	<span style="color: blue;">■</span> Kühlenergie	<span style="color: red;">■</span> HilfsE. Heizen	<span style="color: blue;">■</span> HilfsE. Kühlen

### 8.3.2 Globale Behaglichkeit

Während des Sommerzeitraums (Abbildung 8-3a) liegen die Mediane sowie die Interquartilsbereiche für die adaptiven Varianten (BCL34, BCL34\_ThW, BCL34\_Stuhl, BCL34\_ThW\_Stuhl, BCL34S\_Stuhl\_Vent30) unter denen des Basisreglers (BCL00). Die Unterschiede bewegen sich dabei im Medianbereich zwischen 0,09 bis 0,20 und im Interquartilsbereich von 0,04 bis 0,30. Positiv fällt auf, dass für die beiden Varianten mit Ventilator (BCL34\_Stuhl\_Vent26 und BCL34\_ThW\_Stuhl\_Vent26) der Median um 0,11 und der Interquartilsbereich um 0,28 über denen des Basisreglers (BCL00) liegen. Die Varianten mit dem Ventilator und einem erhöhten oberen Sollwert (BCL34\_\*30) zeigen ähnliche Interquartilsbereiche, während der Median leicht unter dem des Basisreglers (BCL00) liegt.

Der erhöhte Luftstrom für den auf Hitze empfindlich reagierenden Kopf zeigt, wie in etlichen Feld- und Laborstudien bereits beschrieben, auch in der Simulation eine positive Wirkung. Die Behaglichkeitswerte konnten mit den Varianten BCL34\_Stuhl\_Vent26 und BCL34\_ThW\_Stuhl\_Vent26 gegenüber allen anderen Regler-Varianten am besten gesteigert werden. Auch die beiden Varianten mit dem erhöhten Sollwert auf 30 °C zeigen gegenüber den anderen adaptiven Varianten eine Steigerung der Interquartilsbereiche und liegen mit den Behaglichkeitswerten des Basisreglers (BCL00) gleich auf.

### 8.3.3 Heizwärme- und Kühlbedarf, Stromverbrauch und Endenergie

Während der Sommerzeit kommt es bei allen adaptiven Varianten (BCL34, BCL34\_\*) gegenüber dem Basisregler (BCL00) zu einer Reduzierung des Kühlbedarfs (Abbildung 8-3b). Dabei zeigen die adaptiven Varianten mit Ventilator die größte Reduzierung des Kühlbedarfs gegenüber den anderen Reglern. Die beiden Varianten mit einem erhöhten oberen Sollwert von 30 °C (BCL34\_\*30) weisen das größte Einsparpotenzial gegenüber dem Basisregler (BCL00) auf.

Beim Vergleich der benötigten Hilfsenergie (Abbildung 8-3d) wird deutlich, dass die Variante, die die größte Einsparung des Kühlbedarfs (BCL34\_ThW\_Stuhl\_Vent30) erzielt, den meisten Strom für die thermoelektrische Stellwand benötigt. Der Verbrauch der Stellwand, als auch des Stuhls und des Ventilators steigen unter diesen Bedingungen stark an.

Es ist interessant festzustellen, dass die thermoelektrische Heiz- und Kühlwand und der Stuhl bei diesen Varianten mit Ventilator vermehrt Energie zum Heizen benötigen. Hier wird mithilfe der dezentralen Systeme durch verschiedene thermische Stimuli nach dem Ansatz von „Alliesthesia“ die höchste Behaglichkeit erreicht (Abbildung 8-3a). Die thermoelektrische Stellwand wird zum Heizen genutzt, während der Ventilator zum Kühlen dient. Dieser Effekt ergibt sich jedoch auch dann, wenn der Kopf durch den Ventilator gekühlt wird und ein niedrigeres Empfindungslevel erreicht wird. Somit wird der obere Bereich der Stellwand zum Heizen genutzt.

Vergleicht man den Stromverbrauch der verschiedenen Varianten, wird deutlich, dass die Varianten nur mit Stuhl im Vergleich zu den Varianten in Kombination mit der

thermoelektrischen Wand sehr wenig Strom benötigen. Der Ventilator benötigt wenig Energie und stellt daher eine gute Lösung für die Sommermonate dar, da er die thermoelektrische Stellwand als auch den Bürostuhl optimal zu unterstützen vermag.

Abbildung 8-3c vergleicht die benötigte Endenergie der verschiedenen Varianten unter Beachtung des Einsatzes einer reversiblen Wärmepumpe in Relation zum Basisregler BCL00. Es zeigt sich noch mal, dass die Varianten mit der thermoelektrischen Wand einen erhöhten Endenergiebedarf gegenüber dem Basisregler (BCL00) und dem adaptiven Regler BCL34 sowie den anderen Varianten mit Stuhl haben. Die adaptiven Varianten BCL34, BCL34\_Stuhl sowie BCL34\_Stuhl\_Vent zeigen Reduktionen gegenüber dem Basisregler (BCL00). Wie in Abbildung 8-3d zu sehen ist, fällt der Stromverbrauch dieser dezentralen Systeme relativ gering aus und fällt bei der Betrachtung der Endenergie kaum ins Gewicht. Die höchste Reduktion wird gegenüber dem Basisregler mit der Variante BCL34\_Stuhl\_Vent30 erreicht.

## 8.4 Synthese

Es ist bei den Simulationen erkennbar, dass die Behaglichkeit mithilfe der dezentralen Systeme überwiegend im positiven Bereich gehalten oder gesteigert werden kann, bei gleichzeitiger Einsparung des Heizwärme- und Kühlbedarfs.

Tabelle 8-1 fasst die Ergebnisse der Endenergie der genannten Varianten zusammen. Die erfolgte Reduktion wird farblich dargestellt. Die farblichen Grenzen sind wie folgt definiert: dunkelgrün (5 % bis 20 %), hellgrün (1 % bis 5 %), hellgelb (0 % bis - 1 %), hellrot (- 1 % bis - 5 %), dunkelrot (- 5 % bis - 35 %). Betrachtet man die Endenergie bei Berücksichtigung einer reversiblen Wärmepumpe, wirkt sich die thermoelektrische Stellwand in allen Varianten durch einen deutlich höheren Endenergieverbrauch gegenüber den Varianten ohne thermoelektrische Stellwand negativ aus. Je nach betrachtetem Heiz- und Kühlsystem und den berücksichtigten COP-Werten können die Werte der zentralen Heiz- und Kühlanlage von den gezeigten Ergebnissen abweichen.

Im Hinblick auf die Behaglichkeit und die genutzte Endenergie, kann für alle Jahreszeiten der adaptive Regler BCL34 sowie die Varianten mit Stuhl BCL34\_Stuhl und BCL34\_Stuhl\_Vent empfohlen werden. Zeitweise benötigen diese während der Übergangszeit etwas mehr Energie, was jedoch durch eine gesteigerte Behaglichkeit gegenüber dem Basisregler ausgeglichen wird.

Während der Sommerperiode sollte der Ventilator in Kombination mit dem Bürostuhl genutzt werden. Vor allem die Variante mit gesteigertem oberem Sollwert TU von 30 °C kann hier Energie einsparen und gleichzeitig die Behaglichkeitswerte gegenüber dem Basisregler steigern. Diese Sollwerterweiterung auf 30 °C ist nur mit dem Ventilator möglich. Mit der thermoelektrischen Stellwand oder dem Bürostuhl in alleiniger Nutzung konnte diese Steigerung während der Sommermonate nicht realisiert werden.

Tabelle 8-1: Zusammenfassung und Vergleich der Endenergie der verschiedenen Regler-Varianten mit thermoelektrischer Stellwand ThW (ThW), Stuhl und Ventilator (Vent)

		BCL00	BCL34	BCL34_ThW	BCL34_Stuhl	BCL34_ThW_ Stuhl	BCL34_Stuhl_ Vent26	BCL34_Stuhl_ Vent30	BCL34_ThW_ Stuhl_Vent26	BCL34_ThW_ Stuhl_Vent30
Winter	Endenergie	278	243	342	273	357	274	--	358	--
	Reduktion [%]	0.0	12.5	-23.1	1.8	-28.3	1.5	--	-28.9	--
Übergang	Endenergie	76	76	94	79	100	79	69	100	92
	Reduktion [%]	0.0	-0.6	-24.6	-3.8	-32.3	-3.7	9.3	-32.5	-21.8
Sommer	Endenergie	326	320	344	321	347	300	276	333	327
	Reduktion [%]	0.0	1.9	-5.5	1.5	-6.4	7.8	15.3	-2.0	-0.2

Die Behaglichkeit konnte mit dem Ventilator gesteigert werden und in Folge war eine Reduktion des Kühlenergiebedarfs möglich. Dies kann durch die besondere Sensibilität des auf Hitze empfindlich reagierenden Kopfes (Kapitel 4.2.1), der einen erheblichen Einfluss auf die globale Behaglichkeit hat, erklärt werden.

Betrachtet man den Stromverbrauch der einzelnen dezentralen Systeme, sind der Ventilator sowie der Bürostuhl mit Heiz- und Kühlfunktion gegenüber der thermoelektrischen Heiz- und Kühlwand wesentlich effizienter.

Die gezeigten Werte beziehen sich auf die Nutzung durch eine Person. Wenn mehrere Personen auf dezentrale Systeme zurückgreifen sollten, würde sich der Verbrauch entsprechend vergrößern. Aufgrund des unterschiedlichen thermischen Empfindens der Menschen kann es jedoch sein, dass die Systeme nicht synchron genutzt würden. Dies repräsentiert auch nochmals die Idee der dezentralen Heiz- und Kühlsystemen im Bürokontext. Um verschiedenen Raumnutzer\*innen ein optimales Umgebungsklima zu ermöglichen, sollte gegebenenfalls auf die Nutzung dieser Systeme zurückgegriffen werden.

Die Einsparung des Heizwärme- und Kühlbedarfs der Varianten BCL34\_\* im Vergleich zur adaptiven Variante BCL34 zeigt, dass die thermische Behaglichkeit mit allen dezentralen Systemen anfänglich gesteigert und durch die Hilfe der dezentralen Systeme innerhalb der Sollwerte gehalten wurde. Die Adaption erfolgte in Richtung der Anfangssollwerte, was wiederum zu einer Reduktion des Heizwärme- und Kühlbedarfs der zentralen Anlage im Vergleich zum adaptiven Regler BCL34 führte.

Die hier dargestellten Ergebnisse können bei anderen Gebäudestrukturen und Wetterdatensätzen abweichen. Zudem hat die Regelungslogik einen hohen Einfluss auf die Behaglichkeit und den Heizwärme- und Kühlbedarf. Hier kann durch ein optimales Einstellen und Feststellen der Sollwerte der Fokus entweder auf einen energiesparenden

Gebäudebetrieb oder auf die Steigerung der Behaglichkeit gelegt werden. In dieser Arbeit lag der Fokus darauf, die Behaglichkeit bei gleichzeitiger Einsparung des Energiebedarfs der zentralen Heiz- und Kühlanlage in einem positiven Bereich zu halten.

Die Ergebnisse beziehen sich auf Simulationen, bei denen durchgehend Tag und Nacht behagliche Zustände für das Manikin reguliert werden sollten. Es wurde das extremste Szenario hinsichtlich des Energiebedarfs berücksichtigt. Wenn nur die Anwesenheitszeiten der Nutzer\*innen berücksichtigt werden, würde sich der Heizwärme- und Kühlbedarf der zentralen Anlage, aber auch der Strombedarf der dezentralen Systeme merklich senken.

Weiterhin dienen die dezentralen Systeme den Nutzer\*innen zur persönlichen Klimatisierung und Einstellung des Mikroklimas. Das heißt, in der Realität würden diese Systeme nicht automatisch reguliert werden, sondern die Nutzer\*innen könnten selbst Einfluss auf die Steuerung nehmen. Einige Szenarien, wie zum Beispiel die Nutzung der thermoelektrischen Stellwand zum Heizen bei gleichzeitiger Verwendung des Ventilators zum Kühlen, können auch in der Realität auftreten. Diese Szenarien würden in der Realität aber sicherlich weniger oft auftreten als in den gezeigten Simulationen. Hier gilt noch mal der Grundsatz, dass der adaptive Regler zur Potenzialabschätzung für die dezentralen Systeme gedacht ist. Er kann jedoch die genauen Zustände der Realität nicht abbilden.

## 8.5 Vergleich der Ergebnisse mit anderen Forschungsergebnissen

Die Simulationsergebnisse des Ventilators in Kombination mit den dezentralen Systemen zeigen Behaglichkeitssteigerungen und dabei deutliche Einsparungen des Heizwärme- und Kühlbedarfs der zentralen Anlage. Der positive Einfluss eines Ventilators oder einer sonstigen erhöhten Luftgeschwindigkeit auf die Behaglichkeit in warmem Umgebungsklima wurde bereits in etlichen Studien beschrieben .

Studien zeigen, dass die behaglichen Raumtemperaturen bis auf 30 °C gesteigert werden können, wenn das Gesicht oder der Kopf gekühlt werden [9] oder eine erhöhte Zirkulation der Luftgeschwindigkeit vorliegt [136]. Mishra et al. [105] beschreiben in ihrer Studie, dass die Sollwertweiterung in Richtung höherer Temperaturen durch einen verstärkten Luftzug erreicht werden kann. In dieser Arbeit wurde das in den dargestellten Simulationen durch die Implementierung eines Ventilators innerhalb der Regelungslogik der Regler-Varianten ebenfalls bestätigt.

Die Studie von Huang et al. [139] verdeutlicht den Zusammenhang eines geeigneten Physiologie-Modells und die Berücksichtigung der Luftgeschwindigkeit auf lokale Körperteile. Um den konvektiven Wärmeübergang zu beachten und eine Über- oder Unterschätzung des lokalen Luftstroms auf das globale Empfinden zu vermeiden, wurde mittels dem SET-Modell eine Anpassung mithilfe von Regressionskoeffizienten durchgeführt. In dieser Arbeit wird durch die Nutzung von PhySCo und dem detaillierten Physiologie-Modell bereits eine exakte Betrachtung umgesetzt. PhySCo berechnet die lokalen Haut- und Kerntemperaturen der einzelnen Körperteile basierend auf den Umgebungsbedingungen. Hierbei fließt auch die Intensität eines lokalen Luftstroms mit

ein, sodass eine zusätzliche Anpassung mit Regressionskoeffizienten nicht notwendig wird.

Einsparungen des Heizwärme- und Kühlbedarfs, wie sie in der Simulationsstudie von Hoyt et al. [7] im Bereich von 32 %–73 % erreicht wurden, konnten in dieser Studie nicht nachgewiesen werden. Dies mag vielleicht an dem schon geringen Anfangssollwertbereich von 1,1 K in der Studie von Hoyt et al. liegen, der im Vergleich zu dieser Studie mit 3 K (Basisregler) somit wesentlich geringer war. Das erklärt, warum auch größere Einsparungen beschrieben wurden. Weiterhin sind die unterschiedlichen Klimaregionen und Gebäudetypen für weitere mögliche Abweichungen verantwortlich. Ein weiterer beeinflussender Faktor, ist das zu berücksichtigende Heiz- und Kühlsystem. In dieser Studie wurde ein ideales System betrachtet, welches jederzeit ausreichend Heiz- und Kühlenergie zur Verfügung stellt, während in der Simulationsstudie von Hoyt et al. reale Systeme simuliert und berücksichtigt wurden. Zusätzlich sollte nicht unerwähnt bleiben, dass in dieser Studie lediglich ein Raum betrachtet wurde, während die Studie von Hoyt et al. vollständige Bürogebäude betrachtete.

Die Literaturrecherche von Vesely und Zeiler [140] kam zu dem Ergebnis, dass dezentrale Heiz- und Kühlsysteme die thermische Behaglichkeit im neutralen Bereich halten können, wenn die Umgebungstemperatur im Bereich von  $\pm 4$  bis 5 K variiert. Dies konnte bei einer Sollwerterweiterung im Bereich von 18 °C bis 30 °C in dieser Arbeit ebenso bestätigt werden.

Die durch Mishra et al. [105] beschriebene Erweiterung in Richtung eines kühleren Heizsollwertes konnte in dieser Arbeit durch den Einsatz der thermoelektrischen Heiz- und Kühlwand und durch den Bürostuhl mit Heiz- und Kühlfunktion bestätigt werden. Durch die Nutzung der beiden Systeme innerhalb der Regelungslogik erfolgte eine Steigerung der Behaglichkeit bei gleichzeitiger Senkung des Wärmebedarfs der zentralen Heiz- und Kühlanlage.

Der mittlere Bereich der behaglichen Raumtemperaturen wird laut Mishra et al. [104] allein durch das Wechseln der Bekleidung abgedeckt. Das Wechseln der Bekleidung kann schon an sich zu einer Zunahme des Behaglichkeitslevels führen. Diese Bedeutung der Bekleidung auf das globale Empfinden und somit auf die Behaglichkeit wurde auch in dieser Arbeit bestätigt. Die ausgewählten „Bekleidungssets“ haben einen hohen Einfluss auf die Behaglichkeit, das Empfinden und damit in der Folge auf die einzubringende Energie in die Zone. In dieser Arbeit wurden an die Simulationsperiode angepasste und fixierte Bekleidungswerte genutzt

## 9 Zusammenfassung

### 9.1 Ziel

Es war das Ziel der Arbeit, mithilfe eines virtuellen adaptiven Gebäudereglers innerhalb der Gebäudesimulationssoftware Esp-r eine detaillierte thermische Behaglichkeitsberechnung sowie eine Berechnung behaglicher Raumtemperaturen für verschiedene innovative Ansätze durchzuführen. Dabei sollte untersucht werden, ob sich die aufzuwendende Nutz- und Endenergie mit diesen Ansätzen reduzieren lässt. Die Ansätze, waren zum einen die Implementierung des virtuellen adaptiven Gebäudereglers (BCL34), der eine Sollwerterweiterung der Heiz- und Kühlsollwerte der zentralen Anlage durchführt und zum anderen eine Erweiterung dieses Gebäudereglers. Die Erweiterung des Reglers erfolgte mit verschiedenen Varianten unter Einbezug dezentraler Heiz- und Kühlsysteme (BCL34\_\*). Die in dieser Arbeit vorgestellten dezentralen Heiz- und Kühlsysteme sind eine thermoelektrische Heiz- und Kühlwand, ein Bürostuhl mit Heiz- und Kühlfunktion sowie ein Ventilator.

Der virtuelle adaptive Gebäuderegler sollte zur möglichen Potenzialabschätzung bei dem Einsatz dezentraler Heiz- und Kühlsysteme in Kombination mit der zentralen Heiz- und Kühlanlage eines Gebäudes genutzt werden. Dabei wurde der Fokus vor allem auf die Stabilisierung eines positiven Behaglichkeitslevels und wenn möglich auf die Steigerung der Behaglichkeit gelegt. Unter Beachtung des Behaglichkeitslevels der Raumnutzer\*innen sollte ein möglichst energieeffizienter Gebäudebetrieb angestrebt werden.

Einerseits steigt das Interesse an der Nutzung dieser Systeme, andererseits fehlen Planungswerkzeuge zur Anwendung der dezentralen Systeme in der Praxis. Diese Arbeit soll einen Beitrag dazu leisten, den Einsatz von dezentralen Systemen mithilfe der Gebäudesimulation in Zukunft zu optimieren. Der adaptive Gebäuderegler und die Varianten mit den dezentralen Systemen sollen hierbei zur Potenzialabschätzung der dezentralen Systeme hinsichtlich möglichen Behaglichkeitssteigerungen und Energieeinsparungen genutzt werden.

Durch die Anwendung der dezentralen Heiz- und Kühlsysteme soll der Bereich behaglicher Raumlufttemperaturen (zusätzlich) erweitert werden, indem die dezentralen Systeme unmittelbar am Körper heizen oder kühlen. Somit wird sowohl eine niedrigere Heizsollwerttemperatur als auch eine höhere Kühlsollwerttemperatur zur Regulierung der zentralen Anlage ermöglicht.

Grundlage der Implementierung des virtuellen adaptiven Gebäudereglers ist die Kopplung eines Thermophysiologie-, Empfindungs- und Behaglichkeitsmodells mit der Gebäudesimulationssoftware Esp-r.

## 9.2 Vorgehensweise

### Kopplung des Thermophysiologie-, Empfindungs- und Behaglichkeitsmodells mit der Gebäudesimulation

Ein thermophysiologisches Modell zur Bestimmung des thermischen Empfindens und der Behaglichkeit wurde in die Simulationssoftware Esp-r integriert. Damit wird die detaillierte Berechnung von Empfindungs- und Behaglichkeitswerten eines Manikins ermöglicht. Mit diesem Modell sind Berechnungen sowohl für transiente als auch asymmetrische Umgebungsbedingungen möglich. Die detaillierten Berechnungen werden mithilfe des gekoppelten „Physiology, Sensation and Comfort“ Modells (PhySCo) durchgeführt.

Zur exakten Berechnung des thermischen Empfindens innerhalb PhySCo wurden Hauttemperatursollwerte  $T_{s,i, \text{set}}$  bestimmt, die einen neutralen Zustand des Körpers für die jeweilige Bekleidungs- und Aktivitätskombination repräsentieren (Kapitel 5.1.1). Diese wurden zur Berechnung lokaler Empfindungswerte separater Körpersegmente genutzt.

Zur Berechnung der lokalen Werte des thermischen Empfindens und der Behaglichkeit einzelner Körperteile benötigt PhySCo die aktuellen klimatischen Raumbedingungen. Diese wurden von Esp-r für jeden Simulationszeitschritt bestimmt. Esp-r ermittelt die Raumtemperatur, mittlere Strahlungstemperatur und die relative Raumluftfeuchte.

Die mittlere Strahlungstemperatur hat einen großen Einfluss auf die lokalen Behaglichkeitswerte. Um ihre exakte Berechnung zu ermöglichen, wurde der Ansatz „(Wo)Man in Cube“ implementiert. Dieses Modell erlaubt eine präzise und schnelle Berechnung lokaler Werte der mittleren Strahlungstemperatur. Auf dieser Basis konnte eine detaillierte Behaglichkeitsberechnung für den Menschen in der Gebäudesimulation umgesetzt werden.

### Adaptiver Gebäuderegler zur Sollwert-Anpassung

Die oben beschriebene Kopplung wurde innerhalb eines Gebäudereglers in der Gebäudesimulationssoftware Esp-r realisiert. Der Gebäuderegler dient neben der Berechnung der Behaglichkeitswerte auch dazu, auf Basis der Empfindungs- und Behaglichkeitswerte eine Sollwertadaptation der Heiz- und Kühlsollwerte der zentralen Anlage durchzuführen, um anhaltend behagliche Raumtemperaturen zu ermöglichen.

Bei Vorliegen eines höheren Behaglichkeitszustands besteht die Möglichkeit, den Bereich behaglicher Raumtemperaturen durch eine Erweiterung der Sollwerttemperaturen zu vergrößern. Durch diesen erweiterten Bereich behaglicher Raumtemperaturen kann der Heizwärme- und Kühlbedarf der zentralen Anlage gegenüber herkömmlichen Systemen mit starren Sollwerttemperaturen reduziert werden.

## Adaptiver Gebäuderegler zur Berücksichtigung dezentraler Heiz- und Kühlsystemen

Eine Erweiterung des adaptiven Gebäudereglers erfolgte mit dem zusätzlichen Einsatz von Regelungsschleifen für dezentrale Heiz- und Kühlsysteme. Als dezentrale Systeme dienen in der Arbeit eine thermoelektrische Heiz- und Kühlwand, ein Bürostuhl mit Heiz- und Kühlfunktion und ein Ventilator. Diese dezentralen Heiz- und Kühlsysteme dienen der Temperierung des direkten thermischen Umfelds der Nutzer\*innen. Sie können einzeln oder in Kombination innerhalb des adaptiven Reglers genutzt werden.

### 9.3 Ergebnisse

In der Arbeit wurden die Auswirkungen der verschiedenen Gebäuderegler (ein Basisregler mit festen Sollwerten, ein adaptiver Regler und Varianten des adaptiven Reglers mit dezentralen Systemen) innerhalb der Simulationssoftware Esp-r hinsichtlich der Behaglichkeit eines Manikins sowie der benötigten Nutz- und Endenergie untersucht.

Die Simulationsergebnisse des adaptiven Reglers, der die Sollwertadaption auf Grundlage der Behaglichkeitsberechnung durchführt (BCL34), wurden den Ergebnissen des Basisreglers (BCL00) mit den fixierten Sollwerten gegenübergestellt. In weiteren Schritten wurden verschiedene Varianten des adaptiven Reglers mit dezentralen Systemen getestet. Die Simulationsergebnisse des adaptiven Reglers zur Sollwertanpassung (BCL34) wurden mit den Ergebnissen der folgenden Varianten mit dezentralen Systemen (BCL34\_\*) verglichen:

- 1.) der thermoelektrischen Heiz- und Kühlwand (BCL34\_ThW),
- 2.) dem Bürostuhl mit Heiz- und Kühlfunktion (BCL34\_Stuhl),
- 3.) den beiden dezentralen Systemen in Kombination (BCL34\_ThW\_Stuhl),
- 4.) dem Bürostuhl mit Heiz- und Kühlfunktion plus einem Ventilator (BCL34\_Stuhl\_Vent)
- 5.) den beiden dezentralen Systemen plus einem Ventilator (BCL34\_ThW\_Stuhl\_Vent)

Während der Winterperiode erzielte der adaptive Gebäuderegler positive Ergebnisse im Hinblick auf eine Reduzierung des Heizwärmebedarfs der zentralen Heiz- und Kühlanlage. Die Behaglichkeitswerte konnten dabei überwiegend im positiven Bereich gehalten werden. Eine zusätzliche Reduzierung des Heizwärmebedarfs konnte bei Hinzunahme der dezentralen Systeme beobachtet werden. Beim Vergleich des Endenergiebedarfs unter Berücksichtigung einer reversiblen Wärmepumpe und des Stromverbrauchs der dezentralen Systeme konnte im Winter der adaptive Regler (BCL34) dicht gefolgt von der Variante mit Bürostuhl (BCL34\_Stuhl) die besten Ergebnisse erzielen.

Während der Übergangsperiode konnten mit dem adaptiven Regler (BCL34) und allen Varianten mit dezentralen Systemen (BCL34\_\*) die Behaglichkeitswerte gegenüber dem Basisregler gesteigert werden. Gleichzeitig war eine Reduzierung des Heizwärme- und Kühlbedarfs gegenüber dem Basisregler bei allen Varianten (BCL34\_\*) zu erkennen.

Hinsichtlich des Endenergiebedarfs kann die Variante mit Stuhl (BCL34\_Stuhl) empfohlen werden, da diese nur minimal mehr Endenergie benötigt bei gleichzeitiger deutlicher Steigerung der Behaglichkeit. Der Kühlbedarf konnte durch die Hinzunahme des Ventilators und durch die Erhöhung des oberen Kühl-Sollwertes auf 30 °C (BCL34\_Stuhl\_Vent30) sichtbar gesenkt werden.

Während der Sommersimulationsperiode erzielte die adaptive Variante mit Ventilator und einem oberen Sollwert von 26 °C die größte Behaglichkeitssteigerung. Der adaptive Regler (BCL34) und alle Varianten mit dezentralen Systemen (BCL34\_\*) konnten den Kühlbedarf senken. Beim Vergleich der Endenergie konnte die Variante mit Ventilator und einem erhöhten oberen Sollwert von 30 °C (BCL34\_Stuhl\_Vent30) am meisten Energie einsparen (15 % Reduktion). Bei einem oberen Sollwert von 26 °C (BCL34\_Stuhl\_Vent26) betrug die Reduktion noch 8 %.

Durch die Implementierung eines Ventilators in der Regelungslogik konnte eine weitere Steigerung der Behaglichkeitswerte während der Sommersimulationsperiode erzielt werden. Daraus folgte eine starke Reduzierung des Kühlbedarfs der zentralen Heiz- und Kühlanlage. Das führte jedoch bei den kombinierten Varianten mit Stuhl und thermoelektrischer Heiz- und Kühlwand zu einer erhöhten Nutzung der Heizfunktion und zu einem höheren Stromverbrauch.

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass die dezentralen Heiz- und Kühlsysteme die Behaglichkeit des Manikins beeinflussen konnten und zugleich der Heizwärme- und Kühlbedarf der zentralen Anlage mithilfe der dezentralen Systeme reduziert werden konnte. Bezüglich der benötigten Gesamt-Endenergie wiesen jedoch nicht alle Varianten eine positive Bilanz gegenüber dem Referenzfall des Basisreglers auf. In dieser Arbeit konnten vor allem die Varianten mit Stuhl und Ventilator eine positive Wirkung auf die Behaglichkeit sowie bei der Reduktion der Endenergie zeigen.

## 10 Bedeutung, Ausblick und Fazit

Die Ansprüche an Gebäude in Bezug auf thermische Behaglichkeit steigen kontinuierlich. Die höheren Anforderungen an die Temperierung führen oft zu einem erhöhten Energiebedarf. Gleichzeitig werden Richtlinien und Gesetze wie das Gebäudeenergiegesetz (GEG) vorgegeben, um den Energiebedarf eines Gebäudes zu minimieren. Die Vorgaben beziehen sich auf die energetischen Anforderungen der Gebäudehülle, den Einsatz erneuerbarer Energien und allgemein betrachtet auf die Reduzierung des Energiebedarfs des Gebäudes. Dezentrale Heiz- und Kühlgeräte erfahren in den aktuellen Richtlinien noch keine Berücksichtigung. Ebenso waren bisher keine detaillierten Planungswerkzeuge verfügbar, um eine optimale, auf die Person ausgerichtete Klimatisierung, zum Beispiel mit der Nutzung eines dezentralen Systems zu erreichen.

Zur detaillierten energetischen Bilanzierung des Gebäudes und der dazugehörigen Anlagen werden häufig Gebäudesimulationsprogramme genutzt. Für eine Behaglichkeitsbetrachtung können zwar in den meisten Programmen einfache Kennwerte wie die operative Temperatur ( $T_{op}$ ) oder das Predicted Mean Vote (PMV) nach Fanger [76] ermittelt werden, differenzierte Behaglichkeitsberechnungen für asymmetrische und transiente Bedingungen, wie sie beim Einsatz von dezentralen Systemen typisch sind, werden jedoch meist nicht durchgeführt.

Programme, die dezentrale Heiz- und Kühlsysteme auch unter Beachtung der thermischen Behaglichkeitsberechnung berücksichtigen, fehlen gänzlich. Diese Arbeit leistet einen Beitrag dazu, dass in Zukunft eine Potenzialabschätzung solcher dezentralen Systeme durchgeführt werden kann. Damit soll der zukünftige Einsatz von dezentralen Heiz- und Kühlsystemen in Kombination mit der zentralen Heiz- und (gegebenenfalls) Kühlanlage gefördert werden.

### 10.1 Bedeutung der vorliegenden Arbeit

Durch die detaillierten Berechnungen des thermischen Empfindens, der Behaglichkeit und des Heizwärme- und Kühlbedarfs mithilfe von Gebäudesimulation leistet diese Arbeit einen Beitrag zur zukünftigen Planung von dezentralen Heiz- und Kühlsystemen. Mit dem adaptiven Gebäuderegler kann eine Potenzialabschätzung bezüglich einer Behaglichkeitssteigerung und möglicher Energieeinsparungen mit Hilfe dieser Systeme durchgeführt werden.

Der in dieser Arbeit entwickelte Gebäuderegler ermittelt lokale Empfindungs- und Behaglichkeitswerte eines virtuellen Manikins auf Basis von Simulationen. Das PhySCo-Modell, das in die Gebäudesimulation integriert wurde, ermöglicht die Berechnung asymmetrischer und transienter Umgebungsbedingungen, wie sie beispielsweise bei großen Glasfassaden, Strahlungsheizungen und insbesondere bei der Nutzung dezentraler Heiz- und Kühlsysteme auftreten. Diese Systeme setzen die neuesten Erkenntnisse der Behaglichkeitsforschung um, indem sie die zwei Arten der Allästhesie ermöglichen: Zeitliche Allästhesie wird durch die schnelle Antwortzeit der dezentralen

Systeme ermöglicht; lokale Allästhesie wird durch die Anwendung verschiedener lokaler Stimuli erreicht.

Anhand des adaptiven Gebäudereglers und seiner Varianten mit dezentralen Systemen können zukünftig schon im Vorfeld der Gebäuderealisation wichtige Faktoren wie die detaillierte lokale und globale Behaglichkeit der Nutzer\*innen, die voraussichtliche Interaktion mit den dezentralen Systemen und die Betriebsweise der zentralen Heiz- und Kühlanlage vorhergesagt und berücksichtigt werden.

Es sollte natürlich beachtet werden, dass die thermische Behaglichkeit individuell empfunden wird und nur schwer monetär bewertet werden kann. Während das Manikin lediglich einen „Durchschnittsmenschen“ repräsentiert, hängt sie bei jedem Menschen von verschiedenen physiologischen Faktoren ab. Eine Weiterentwicklung des Reglers diesbezüglich ist möglich und sollte auch angestrebt werden. Ähnlich dem „Advanced Comfort Model“ [113] wäre es vorstellbar, durch die Berücksichtigung von Körpergröße, Körperfettanteil und Alter dem Physiologiemodell detailliertere Berechnungen zu erlauben. Es sollte dennoch beachtet werden, dass die Berechnungen mit den numerischen Modellen theoretische Betrachtungen darstellen, die durch weitere experimentelle Studien validiert werden sollten.

## 10.2 Potenzielle Weiterentwicklung des adaptiven Gebäudereglers mit und ohne dezentrale Systeme

Ein wichtiger Punkt, der verfolgt werden sollte, ist die Modellierung der dezentralen Systeme als eigene Heiz- und Kühlsysteme innerhalb der Anlagentechnik. Dabei sollten die dezentralen Systeme detailliert in der Energiebilanz berücksichtigt werden, sodass präzisere Rückschlüsse hinsichtlich der Energieeffizienz des Gesamtsystems möglich sind. Mit dem adaptiven Regler ist eine theoretische Potenzialabschätzung möglich.

Ein weiterer Schritt wäre die Umsetzung des virtuellen adaptiven Reglers in einem realen Gebäude. Hierbei sind verschiedene Ansätze notwendig, die miteinander kombiniert werden müssen:

Zunächst müssen das thermische Empfinden und die thermische Behaglichkeit der Nutzer\*innen ermittelt werden. Dies kann über drei verschiedene Wege durchgeführt werden. Die Raumnutzer\*innen können ihr subjektives Empfinden und die damit verbundene Behaglichkeit regelmäßig mitteilen und parallel dazu die dezentralen Heiz- und Kühlsysteme bedienen. Dieser Ansatz wurde für die thermoelektrische Heiz- und Kühlwand bereits prototypisch umgesetzt [120]. Das ungefähre thermische Empfinden und die Behaglichkeit können auch indirekt über die Einschaltquote der dezentralen Systeme ermittelt werden. Hiermit wäre es möglich eine Information über den aktuellen Zustand (heiß/kalt) zu bekommen. Dieser Ansatz wurde, bereits mit den Bürostühlen mit Heiz- und Kühlfunktion umgesetzt [116, 141]. Ein weiterer Ansatz wäre die indirekte Ermittlung des thermischen Empfindens und der thermischen Behaglichkeit über die Berechnung ausgewählter Hauttemperaturen. Die Ermittlung der Hauttemperaturen könnte kamerabasiert [142] oder über Sensoren erfolgen.

Gleichzeitig muss ein Abgleich mit den Umgebungsbedingungen erfolgen. Hierzu könnte zum Beispiel die Sensorstation CoMoS („Comfort Monitoring Station“) [143] genutzt werden. Diese führt eine Berechnung des PMV-Wertes an jedem einzelnen Arbeitsplatz durch. Werden diese Informationen an den Gebäuderegler übergeben, kann die Regelung der zentralen Anlage die Heiz- und Kühlleistungen anpassen.

Zusätzlich wäre es möglich, den Regler modellprädiktiv zu gestalten, sodass er auch auf die vorhergesagten Wetterbedingungen reagiert. Um auf die individuellen Präferenzen der Nutzer\*innen einzugehen, könnten mittels Machine-Learning verschiedene Profile für die Nutzer\*innen ermittelt werden, wie es auch in der Studie von Kim et al. [116] erwähnt wird. Gleichzeitig sollten basierend auf empirischen Studien die gewählten Sollwerte in der Logik zur Adaption der zentralen Heiz- und Kühlanlage sowie die Sollwerte der dezentralen Systeme auf die reale Situation angepasst werden.

### 10.3 Fazit

Es kann positiv erwähnt werden, dass über den gesamten Beobachtungszeitraum bei Verwendung eines adaptiven Gebäudereglers (BCL34\_\*) der Heizwärme- und Kühlbedarf der zentralen Heiz- und Kühlanlage im Vergleich zum Basisregler (BCL00) reduziert werden konnte, während die Behaglichkeitswerte überwiegend im positiven Bereich gehalten wurden.

In der Forschung zeichnet es sich bereits ab, dass der Einsatz dezentraler Heiz- und Kühlgeräte immer mehr in den Fokus gerät und die ersten Systeme, wie beispielsweise der Bürostuhl mit Heiz- und Kühlfunktion bereits auf dem Markt erhältlich sind. Es fehlten jedoch noch Planungswerkzeuge, um den Einsatz dieser Systeme im Gebäudekontext frühzeitig zu berücksichtigen. Diese Arbeit hat eine Grundlage geschaffen, um die dezentralen Heiz- und Kühlsysteme in der Gebäudeplanung zu berücksichtigen und eine Potenzialanalyse hinsichtlich der Behaglichkeit der Nutzer\*innen und der Reduktion der Endenergie durchzuführen.

Es lässt sich zusammenfassen, dass sich der Einsatz von dezentralen Systemen nur dann lohnt, wenn diese energiesparend betrieben werden. In dieser Arbeit wurden reale, verfügbare Systeme mit unterschiedlichen Energieverbräuchen implementiert und in der Gebäudesimulation getestet. Hier hat sich gezeigt, dass die Systeme mit niedrigem Verbrauch sowohl zu einer Steigerung der thermischen Behaglichkeit geführt beziehungsweise zur Erhaltung eines positiven Behaglichkeitslevels beigetragen haben, während der Energieverbrauch reduziert werden konnte. Die Behaglichkeit kann zwar mit allen dezentralen Systemen gehalten oder gesteigert werden, eine Reduktion des gesamten Energiebedarfs im Gebäude ist jedoch nur mit dezentralen Systemen möglich, deren Energiebedarf selbst gering ist.

# Anhang A Daten für PhySCo und Kopplung

## I. Koeffizienten des Physiologie-Modells

Tabelle 10-1: Koeffizienten des aktiven Systems

Control.txt	CSW	SSW	PSW	CDIL	SDIL	PDIL	CCON	SCHON	PCON	CCHIL	SCHIL	PCHIL	BULL	SH Skeleton	SH Fat	SH Other
	371,2	33,64	0	117	7,5	0	5	5	0	0	0	24,36	10	0,5	0,6	0,9

Tabelle 10-2: Koeffizienten für die Verteilungsraten

i	Körper- teil	S <sub>area</sub> [m <sup>2</sup> ]	Metf	chilf	skinc	skinv	skinr	skins
1	<b>Kopf</b>	0,1396	0	0,02	0,05	0,132	0,0695	0,083
2	<b>Brust</b>	0,1751	0,091	0,258	0,045	0,098	0,1492	0,052
3	<b>Rücken</b>	0,1611	0,08	0,227	0,04	0,086	0,1321	0,079
4	<b>Hüfte</b>	0,2208	0,129	0,365	0,0641	0,138	0,2122	0,113
5	<b>L. Schulter</b>	0,096	0,0261 5	0,004	0,016	0,0312 5	0,0226 5	0,029
6	<b>R. Schulter</b>	0,096	0,0261 5	0,004	0,016	0,0312 5	0,0226 5	0,029
7	<b>L. Arm</b>	0,0628	0,0138 5	0,026	0,009	0,0162 5	0,0116 5	0,021
8	<b>R. Arm</b>	0,0628	0,0138 5	0,026	0,009	0,0162 5	0,0116 5	0,021
9	<b>L. Hand</b>	0,0502	0,005	0	0,175	0,061	0,0922 5	0,047
10	<b>R. Hand</b>	0,0502	0,005	0	0,175	0,061	0,0922 5	0,047
11	<b>L. Oberschenkel</b>	0,2093	0,201	0,023	0,016	0,092	0,0501 25	0,098
12	<b>R. Oberschenkel</b>	0,2093	0,201	0,023	0,016	0,092	0,0501 25	0,098
13	<b>L. Unterschenkel</b>	0,1124	0,099	0,012	0,027	0,023	0,0251 25	0,091
14	<b>R. Unterschenkel</b>	0,1124	0,099	0,012	0,027	0,023	0,0251 25	0,091
15	<b>L. Fuß</b>	0,056	0,005	0	0,175	0,05	0,0167	0,051
16	<b>R. Fuß</b>	0,056	0,005	0	0,175	0,05	0,0167	0,051

Tabelle 10-3: Koeffizienten der 65 Knoten für die basale Rate(Q<sub>b</sub>), die Blutflussrate (B<sub>f</sub>), Wärmeleitfähigkeit (Cond), die Wärmekapazität (Capacity) und die Knotensollwerte (Test)

Schicht (j)	Knoten	Qb [W]	Bf [l/h]	Cond [W/C]	Capacity [Wh/C]	Tset [°C]
<b>Kern</b>	1	14,52	45	1,38	2,221	36,7
<b>Muskel</b>	2	0,187	0,87	11,4	0,333	36,1
<b>Fett</b>	3	0,094	0,34	13,8	0,222	35,8
<b>Haut</b>	4	0,113	2,24	0	0,243	34,8
<b>Kern</b>	5	18,26	77,85	0,531	2,513	36,5
<b>Muskel</b>	6	2,187	7,66	1,81	4,887	36,2
<b>Fett</b>	7	0,49	1,34	7,9	1,29	34,5
<b>Haut</b>	8	0,154	1,8	0	0,36	34,4
<b>Kern</b>	9	16,12	76,34	0,512	2,13	36,5
<b>Muskel</b>	10	2,187	7,66	1,74	4,329	35,8
<b>Fett</b>	11	0,432	1,34	7,5	1,14	34,4
<b>Haut</b>	12	0,136	1,35	0	0,333	34,4
<b>Kern</b>	13	6,94	18,19	0,327	5,187	36,3
<b>Muskel</b>	14	3,506	12,28	1,1	6,894	35,6
<b>Fett</b>	15	0,693	2,16	4,4	1,812	34,5
<b>Haut</b>	16	0,219	2,08	0	0,522	34,7
<b>Kern</b>	17	0,156	0,32	0,38	0,43375	35,8
<b>Muskel</b>	18	0,365	1,28	2,54	0,92925	34,6
<b>Fett</b>	19	0,526	0,16	6,3	0,1785	33,8
<b>Haut</b>	20	0,043	0,86	0	0,1305	33,4
<b>Kern</b>	21	0,156	0,32	0,38	0,43375	35,8
<b>Muskel</b>	22	0,365	1,28	2,54	0,92925	34,6
<b>Fett</b>	23	0,526	0,16	6,3	0,1785	33,8
<b>Haut</b>	24	0,043	0,86	0	0,1305	33,4
<b>Kern</b>	25	0,081	0,16	0,21	0,27675	35,5
<b>Muskel</b>	26	0,19	0,67	1,92	0,58725	34,8
<b>Fett</b>	27	0,027	0,085	6,8	0,1125	34,7
<b>Haut</b>	28	0,022	0,45	0	0,0855	33,6
<b>Kern</b>	29	0,081	0,16	0,21	0,27675	35,5
<b>Muskel</b>	30	0,19	0,67	1,92	0,58725	34,8
<b>Fett</b>	31	0,027	0,085	6,8	0,1125	34,7
<b>Haut</b>	32	0,022	0,45	0	0,0855	33,6
<b>Kern</b>	33	0,039	0,091	1,88	0,071	35,4
<b>Muskel</b>	34	0,019	0,078	5,59	0,0315	35,3
<b>Fett</b>	35	0,02	0,042	5,05	0,045	35,3
<b>Haut</b>	36	0,043	0,91	0	0,0855	32,9
<b>Kern</b>	37	0,039	0,091	1,88	0,071	35,4
<b>Muskel</b>	38	0,019	0,078	5,59	0,0315	35,3
<b>Fett</b>	39	0,02	0,042	5,05	0,045	35,3
<b>Haut</b>	40	0,043	0,91	0	0,0855	32,9
<b>Kern</b>	41	0,296	0,364	2,07	1,435	35,8

<b>Muskel</b>	42	0,71	0,855	3,91	3,10725	35,2
<b>Fett</b>	43	0,13	0,15	26	0,483	34,4
<b>Haut</b>	44	0,105	0,38	0	0,3645	33,4
<b>Kern</b>	45	0,296	0,364	2,07	1,435	35,8
<b>Muskel</b>	46	0,71	0,855	3,91	3,10725	35,2
<b>Fett</b>	47	0,13	0,15	26	0,483	34,4
<b>Haut</b>	48	0,105	0,38	0	0,3645	33,4
<b>Kern</b>	49	0,088	0,071	1,63	0,684	35,6
<b>Muskel</b>	50	0,19	0,07	2,29	1,47825	34,4
<b>Fett</b>	51	0,03	0,0185	6,5	0,231	33,9
<b>Haut</b>	52	0,02	0,11	0	0,1755	32,7
<b>Kern</b>	53	0,088	0,071	1,63	0,684	35,6
<b>Muskel</b>	54	0,19	0,07	2,29	1,47825	34,4
<b>Fett</b>	55	0,03	0,0185	6,5	0,231	33,9
<b>Haut</b>	56	0,02	0,11	0	0,1755	32,7
<b>Kern</b>	57	0,105	0,049	7	0,1195	35,1
<b>Muskel</b>	58	0,03	0,01	8,85	0,0315	34,9
<b>Fett</b>	59	0,048	0,019	7,05	0,066	34,4
<b>Haut</b>	60	0,086	0,45	0	0,108	31,1
<b>Kern</b>	61	0,105	0,049	7	0,1195	35,1
<b>Muskel</b>	62	0,03	0,01	8,85	0,0315	34,9
<b>Fett</b>	63	0,048	0,019	7,05	0,066	34,4
<b>Haut</b>	64	0,086	0,45	0	0,108	31,1
<b>Blutknoten</b>	65	0	0	0	2,25	36,6

## II. Sollwerte $T_{s,i,set}$ für das "Sensation and Comfort" Modell

Bekleidung	Sommer 0,6 clo						Frühling 0,7 clo					
	26.7	25.4	24.7	23.9	23.2	26.1	24.7	23.9	23.1	23.1	22.4	
Neutrale Temp. [°C]	26.7	25.4	24.7	23.9	23.2	26.1	24.7	23.9	23.1	23.1	22.4	
metabol. Rate [W/m <sup>2</sup> ]	52.56	58.4	64	70	76	52.56	58.4	64	70	70	76	
met	0.9	1	1.1	1.2	1.3	0.9	1	1.1	1.2	1.2	1.3	
Kopf	35.004	34.855	34.849	34.832	34.84	34.998	34.828	34.804	34.794	34.794	34.811	
Brust	34.416	34.213	34.162	34.094	34.053	34.638	34.447	34.394	34.353	34.353	34.337	
Rücken	34.483	34.279	34.224	34.152	34.106	34.509	34.29	34.219	34.158	34.158	34.124	
Hüfte	34.086	33.804	33.722	33.616	33.546	34.012	33.698	33.586	33.488	33.488	33.426	
L.Schulter	32.813	32.586	32.573	32.529	32.51	32.995	32.772	32.75	32.734	32.734	32.741	
R.Schulter	32.813	32.586	32.573	32.529	32.51	32.995	32.772	32.75	32.734	32.734	32.741	
L.Arm	31.944	31.785	31.727	31.64	31.568	32.376	32.241	32.192	32.139	32.139	32.101	
R.Arm	31.944	31.785	31.727	31.64	31.568	32.376	32.241	32.192	32.139	32.139	32.101	
L.Hand	30.313	29.568	29.419	29.218	29.116	30.046	29.206	28.986	28.816	28.816	28.747	
R.Hand	30.313	29.568	29.419	29.218	29.116	30.046	29.206	28.986	28.816	28.816	28.747	
L.Oberschenkel	33.55	33.466	33.508	33.5	33.501	33.695	33.611	33.642	33.656	33.656	33.676	
R.Oberschenkel	33.55	33.466	33.508	33.5	33.501	33.695	33.611	33.642	33.656	33.656	33.676	
L.Unterschenkel	32.155	32.117	32.185	32.153	32.12	32.195	32.155	32.206	32.203	32.203	32.195	
R.Unterschenkel	32.155	32.117	32.185	32.153	32.12	32.195	32.155	32.206	32.203	32.203	32.195	
L.Fuß	30.97	30.443	30.485	30.48	30.55	30.972	30.406	30.411	30.464	30.464	30.59	
R.Fuß	30.97	30.443	30.485	30.48	30.55	30.972	30.406	30.411	30.464	30.464	30.59	

Bekleidung	Herbst 0,8						Winter 1,0 clo					
	25.4	24	23.2	22.4	21.6	24.8	23.4	22.5	21.7	20.8		
Neutrale Temp. [°C]												
metabol. Rate [W/m <sup>2</sup> ]	52.56	58.4	64	70	76	52.56	58.4	64	70	76		
met	0.9	1	1.1	1.2	1.3	0.9	1	1.1	1.2	1.3		
Kopf	34.956	34.793	34.773	34.767	34.76	34.93	34.773	34.735	34.735	34.704		
Brust	34.711	34.544	34.505	34.476	34.446	34.783	34.635	34.587	34.57	34.529		
Rücken	34.504	34.301	34.238	34.185	34.131	34.577	34.393	34.32	34.28	34.212		
Hüfte	33.889	33.582	33.475	33.38	33.283	33.818	33.519	33.384	33.297	33.169		
L.Schulter	33.363	33.201	33.211	33.227	33.229	33.556	33.43	33.433	33.468	33.461		
R.Schulter	33.363	33.201	33.211	33.227	33.229	33.556	33.43	33.433	33.468	33.461		
L.Arm	32.46	32.347	32.31	32.27	32.221	32.998	32.927	32.904	32.895	32.858		
R.Arm	32.46	32.347	32.31	32.27	32.221	32.998	32.927	32.904	32.895	32.858		
L.Hand	29.619	28.807	28.611	28.464	28.316	29.289	28.495	28.225	28.105	27.881		
R.Hand	29.619	28.807	28.611	28.464	28.316	29.289	28.495	28.225	28.105	27.881		
L.Oberschenkel	33.839	33.791	33.841	33.873	33.881	33.858	33.831	33.867	33.912	33.903		
R.Oberschenkel	33.839	33.791	33.841	33.873	33.881	33.858	33.831	33.867	33.912	33.903		
L.Unterschenkel	32.11	32.115	32.191	32.207	32.172	32.247	32.298	32.36	32.402	32.351		
R.Unterschenkel	32.11	32.115	32.191	32.207	32.172	32.247	32.298	32.36	32.402	32.351		
L.Fuß	30.56	30.037	30.078	30.168	30.241	30.34	29.857	29.851	29.979	30.006		
R.Fuß	30.56	30.037	30.078	30.168	30.241	30.34	29.857	29.851	29.979	30.006		

### III. Bekleidung sitzendes Manikin

Je nach Simulationsperiode wurden verschiedene Bekleidungssets genutzt. Die Bekleidungssets für ein sitzendes Manikin berücksichtigen im Bereich des Rückens, der

Hüfte und der Oberschenkel zusätzlich 0,1 clo um den Bürostuhl zu berücksichtigen. Die folgende Tabelle 10-4 zeigt  $f_{cl}$  und  $I_{cl}$  für typische Bekleidungssets der vier Jahreszeiten.

Tabelle 10-4:  $I_{cl}$  und  $f_{cl}$  für die vier Bekleidungssets mit Berücksichtigung des Bürostuhls für das sitzende Manikin

	Herbst		Frühling		Winter		Sommer	
	$f_{cl}$	$I_{cl}$	$f_{cl}$	$I_{cl}$	$f_{cl}$	$I_{cl}$	$f_{cl}$	$I_{cl}$
Kopf	1,00	0	1,00	0	1,00	0	1,00	0
Brust	1,52	1,75	1,45	1,5	1,60	1,98	1,33	1,1
Rücken	1,43	1,45	1,40	1,35	1,48	1,62	1,37	1,25
Hüfte	1,40	1,35	1,40	1,35	1,40	1,35	1,40	1,35
L. Oberarm	1,36	1,2	1,27	0,9	1,42	1,42	1,22	0,74
R. Oberarm	1,36	1,2	1,27	0,9	1,42	1,42	1,22	0,74
L. Arm	1,21	0,7	1,18	0,6	1,30	0,99	1,12	0,41
R. Arm	1,21	0,7	1,18	0,6	1,30	0,99	1,12	0,41
L. Hand	1,00	0	1,00	0	1,00	0	1,00	0
R. Hand	1,00	0	1,00	0	1,00	0	1,00	0
L. Oberschenkel	1,28	0,94	1,22	0,74	1,31	1,03	1,17	0,58
R. Oberschenkel	1,28	0,94	1,22	0,74	1,31	1,03	1,17	0,58
L. Unterschenkel	1,18	0,6	1,16	0,55	1,21	0,705	1,14	0,48
R. Unterschenkel	1,18	0,6	1,16	0,55	1,21	0,705	1,14	0,48
L. Fuß	1,27	0,9	1,27	0,9	1,28	0,93	1,24	0,8
R. Fuß	1,27	0,9	1,27	0,9	1,28	0,93	1,24	0,8

#### IV. Temperaturmessungen Bürostuhl mit Heiz- und Kühlfunktion

Zur Annahme realistischer Temperaturdifferenzen während der Nutzung der Heiz- und Kühlfunktion, wurde eine Messstudie mit einem Probanden im „Living Lab Smart Office Space“ durchgeführt. Die Temperaturmessung erfolgte mit Temperatursensoren die an der Hautoberfläche des Probanden und an der Stuhloberfläche angebracht wurden.

Der Proband trug leichte Sommerkleidung, bestehend aus einer langen Stoffhose, einer Unterhose, Socken, T-Shirt und einem Kurzarmhemd. Acht Sensoren wurden auf der Haut angebracht, sodass sie beim Versuchsaufbau zwischen Stuhl und Person, wie in Abbildung 10-1 gezeigt, positioniert waren. Zwei weitere Sensoren (die vorderen der Sitzfläche) wurden zwischen Kleidung und Sitzfläche angebracht.

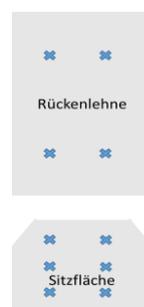


Abbildung 10-1: Anordnung der Temperatursensoren am sitzenden Probanden und am Stuhl

Die Werte des Temperaturunterschiedes unterscheiden sich je nach Lage der Sensoren und auch nach der Sitz-Position des Probanden.

### Ventilation Stufe II

Bei der Funktion Ventilation Stufe II sind Unterschiede zwischen der Rückenlehne und dem Sitzpolster erkennbar. Bei den hinteren zwei Messpunkten, an denen der Hintern aufliegt, kam es sogar zu einem Temperaturanstieg.

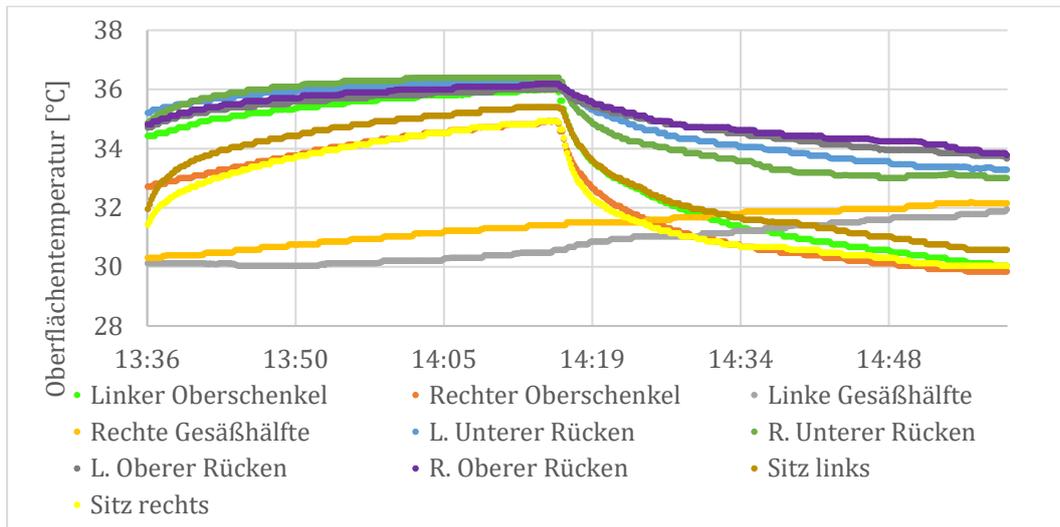


Abbildung 10-2: Temperaturmessung mit einem Probanden bei Nutzung des Bürostuhls mit Ventilation Stufe II

Es ist erkennbar, dass sich die Messpunkte des unteren Rückens und des oberen Rückens um 1 K voneinander unterscheiden. Dies kommt wahrscheinlich durch die Sitzposition des Probanden.

## Heizfunktion Stufe II

Bei diesem Versuch kann es durch einen Messfehler Temperaturspitzen des linken Oberschenkels. Diese einzelnen Spitzenwerte können vernachlässigt werden.

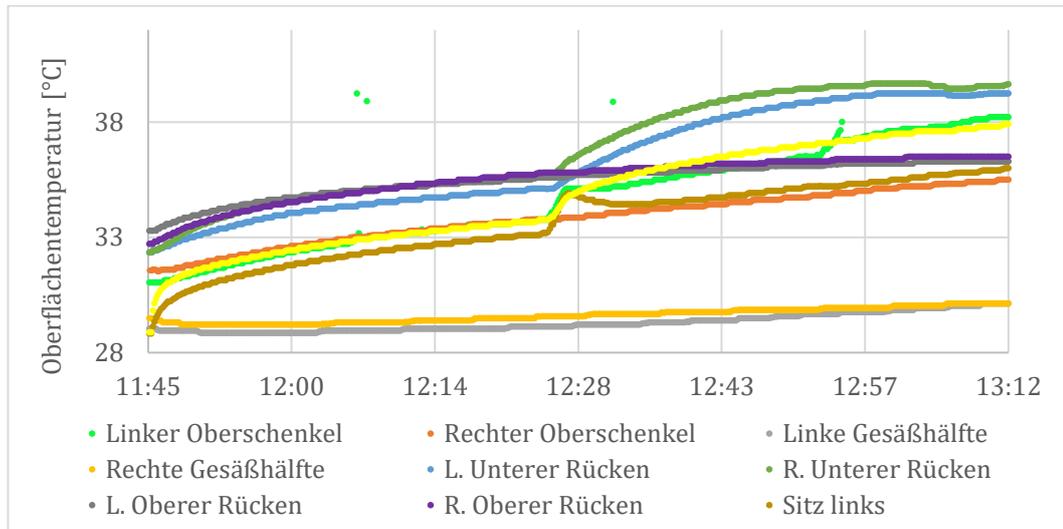


Abbildung 10-3: Temperaturmessung mit einem Probanden bei Nutzung des Bürostuhls mit Heizfunktion Stufe II

Es fällt auf, dass der obere Rücken nicht durch die Heizfunktion beeinflusst wird. Hier fehlt vielleicht die Heizmatte im oberen Teil des Stuhls bzw. hat der Proband keinen flächigen Kontakt. Die Oberschenkel sind ungleichmäßig durch die Heizfunktion beeinträchtigt. Dies kann zwei Gründe haben 1.) der Bereich ist nicht durch die Heizmatte beeinflusst oder der Proband saß ungleichmäßig. Nach der Aufwärmphase steigt die Temperatur nicht weiter an. Die Heizenergie wird automatisch gedrosselt, wenn die Maximaltemperatur erreicht wird.

Bei den Versuchen konnten  $\pm 3\text{K}$  Temperaturänderungen an der Hautoberfläche festgestellt werden, sodass eine Temperaturänderung von  $\pm 4\text{K}$  Temperaturänderung am Stuhl für den Kühl/Heizfall angenommen wird.

### V. Auswahl des Manikins und der dezentralen Heiz- und Kühlsysteme in der grafischen Bedienoberfläche von Esp-r

Sowohl das Manikin als auch die dezentralen Systeme, können im Menü der MRT-Sensoren ausgewählt werden.

Nach Auswahl des jeweiligen Manikins (sitzend oder stehend) hat der Anwendende die Möglichkeit ein dezentrales System und die gewünschten Klimafunktionen auszuwählen bevor das Manikin im Raum platziert wird. Bevor eine Simulation durchgeführt wird, muss eine Berechnung der Sichtfaktoren für die Raumgeometrie als auch für die drei MRT-Sensoren erfolgen.

Beim sitzenden Manikin können die thermoelektrische Heiz- und Kühlwand und/oder der Bürostuhl mit Heiz- und Kühlfunktion ausgewählt werden.

Beim stehenden Manikin beschränkt sich die Auswahl auf die thermoelektrische Stellwand.

Danach müssen die Sichtfaktoren innerhalb der Esp-r Berechnung durchgeführt werden.

Die Auswahl des Manikins und der dezentralen Systeme erfolgt folgendermaßen:

Start im Menü: "Model Management"

- m: browse / edit / simulate
- c: composition
- h: view factors & radiant sensors
  - + Add predefined manikin sensor
  - + "Sitting" oder "Standing"
  - Auswahl der jeweiligen dezentralen Heiz- oder Kühlsystemen

## Anhang B Wetterdateien

### 1. Januar bis 15. März

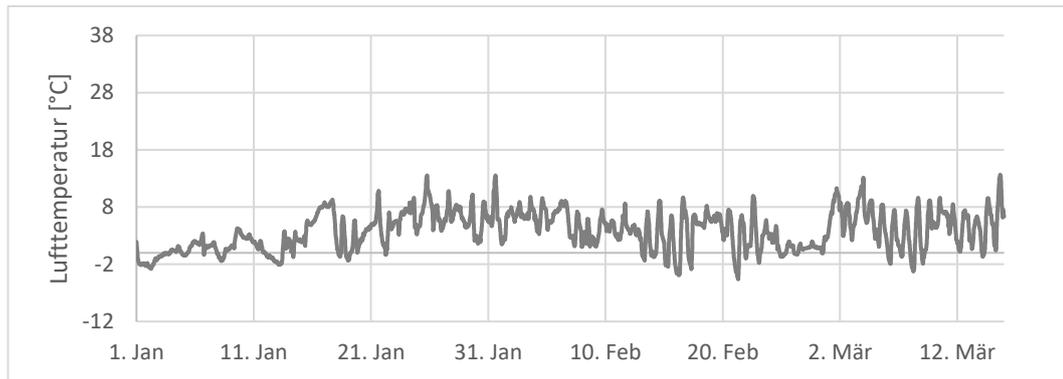


Abbildung 10-4: Lufttemperatur während der Simulationsperiode vom 1. Januar bis zum 15. März

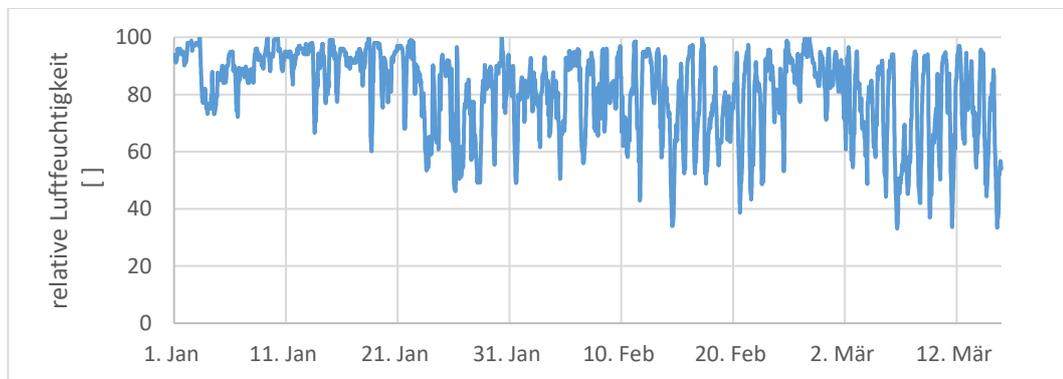


Abbildung 10-5: Relative Luftfeuchtigkeit während der Simulationsperiode vom 1. Januar bis zum 15. März

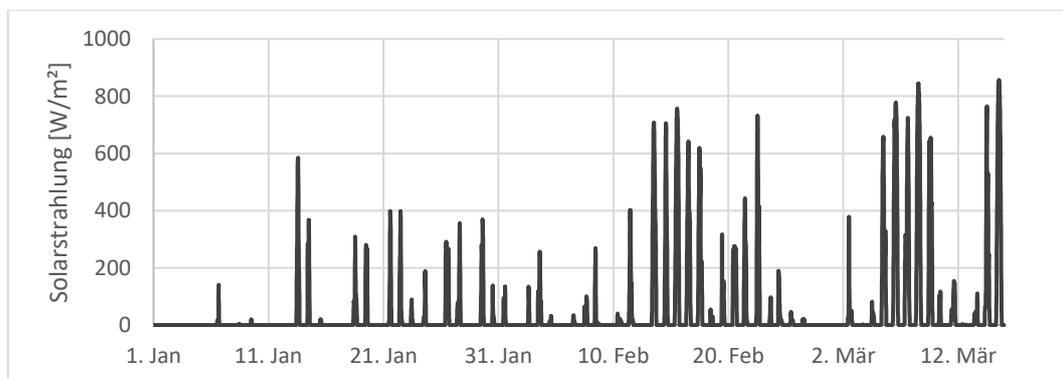


Abbildung 10-6: Solarstrahlung während der Simulationsperiode vom 1. Januar bis zum 15. März

## 15. März bis 15. Mai

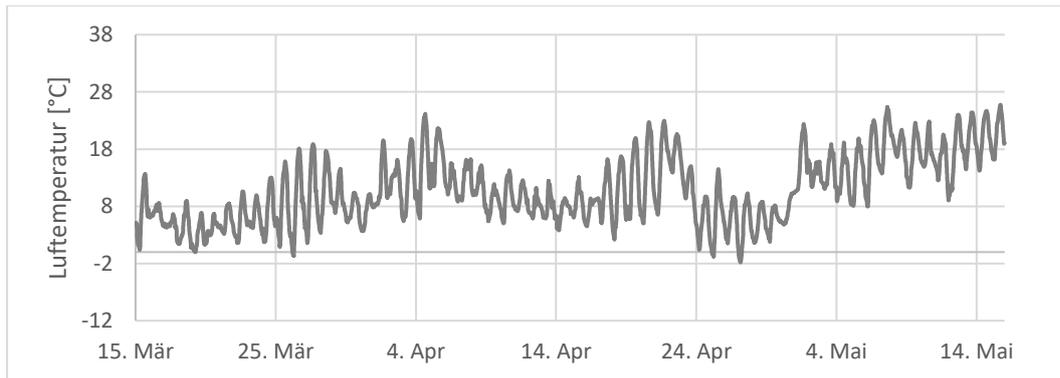


Abbildung 10-7: Lufttemperatur während der Simulationsperiode vom 15. März bis zum 15. Mai

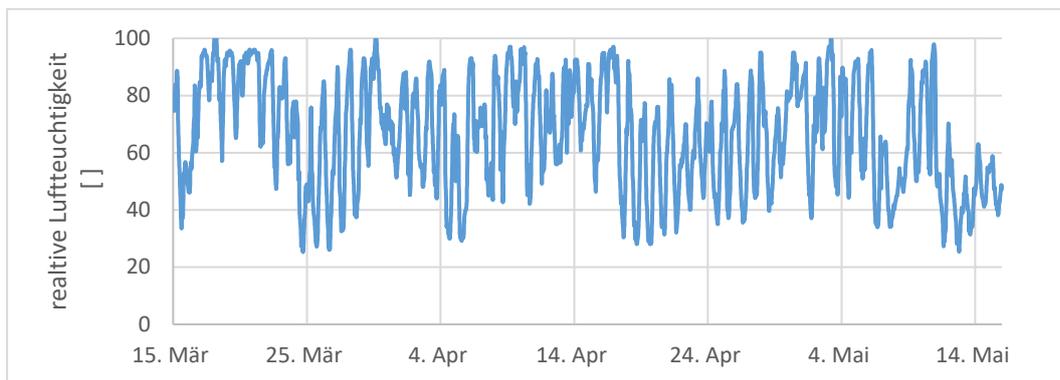


Abbildung 10-8: Relative Luftfeuchtigkeit während der Simulationsperiode vom 15. März bis zum 15. Mai

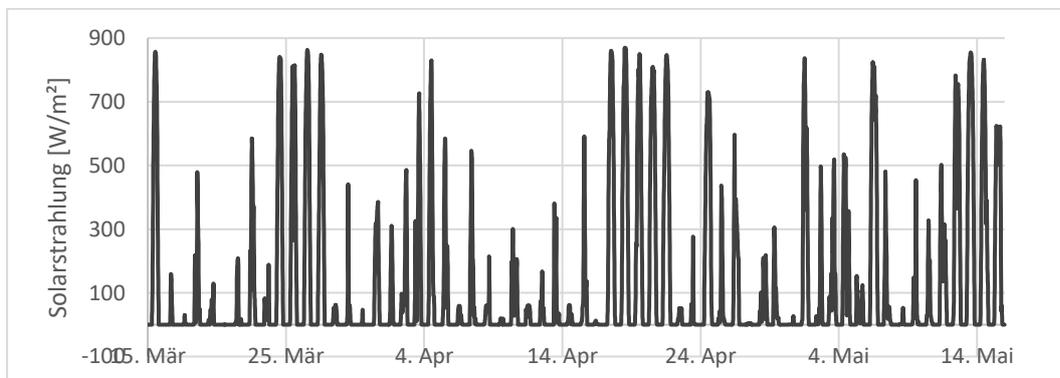


Abbildung 10-9: Solarstrahlung während der Simulationsperiode vom 15. März bis zum 15. Mai

15. Mai bis 15. Oktober

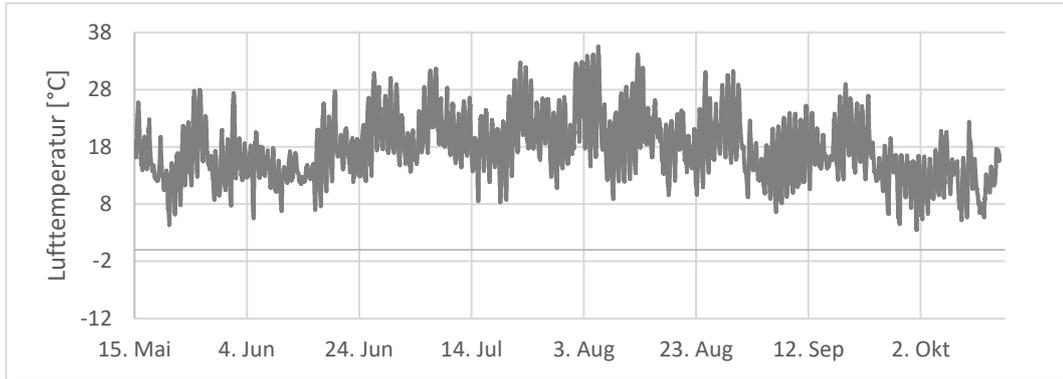


Abbildung 10-10: Lufttemperatur während der Simulationsperiode vom 15. Mai bis zum 15. Oktober

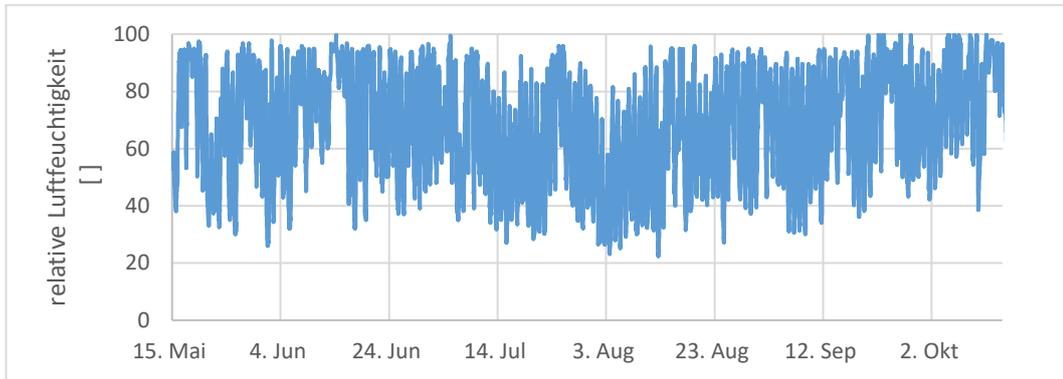


Abbildung 10-11: Relative Luftfeuchtigkeit während der Simulationsperiode vom 15. Mai bis zum 15. Oktober

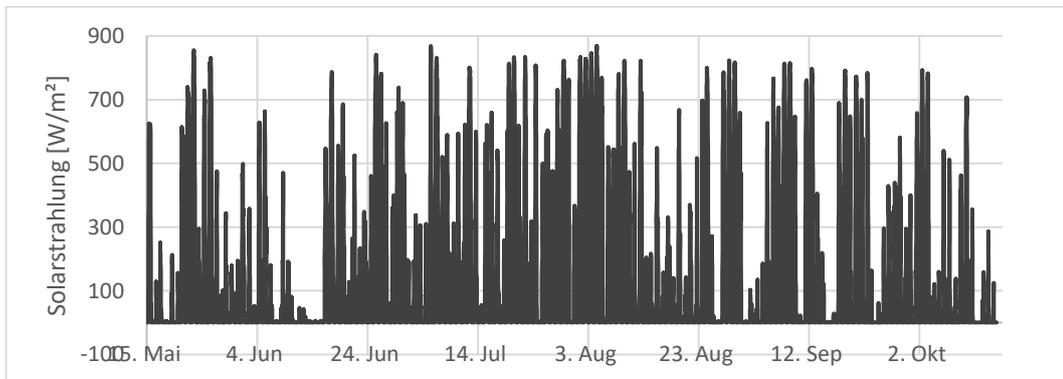


Abbildung 10-12: Solarstrahlung während der Simulationsperiode vom 15. Mai bis zum 15. Oktober

15. Oktober bis 31. Dezember

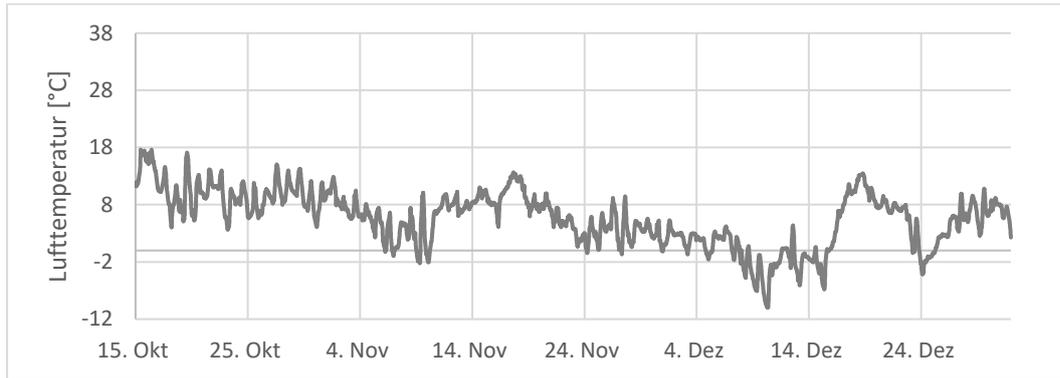


Abbildung 10-13: Lufttemperatur während der Simulationsperiode vom 15. Oktober bis zum 31. Dezember

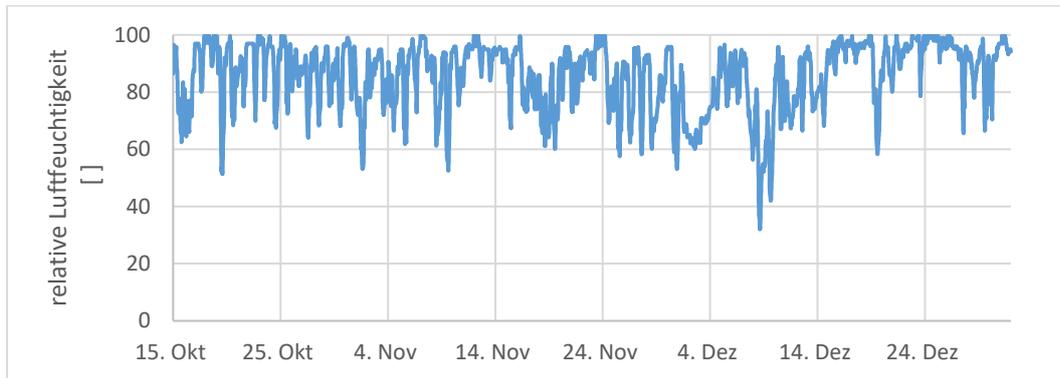


Abbildung 10-14: Relative Luftfeuchtigkeit während der Simulationsperiode vom 15. Oktober bis zum 31. Dezember

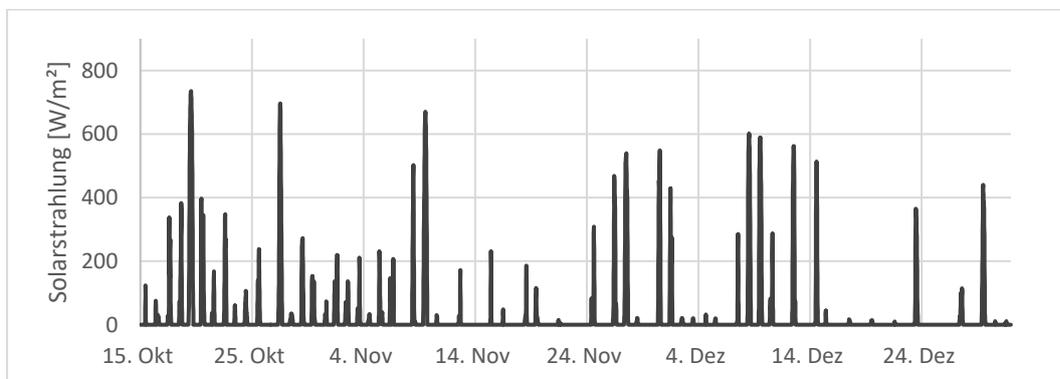
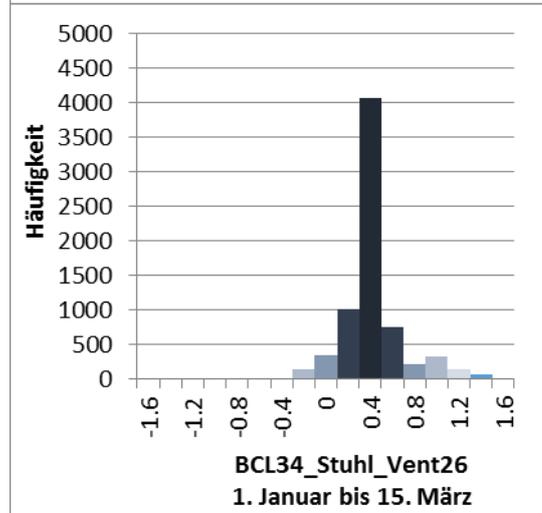
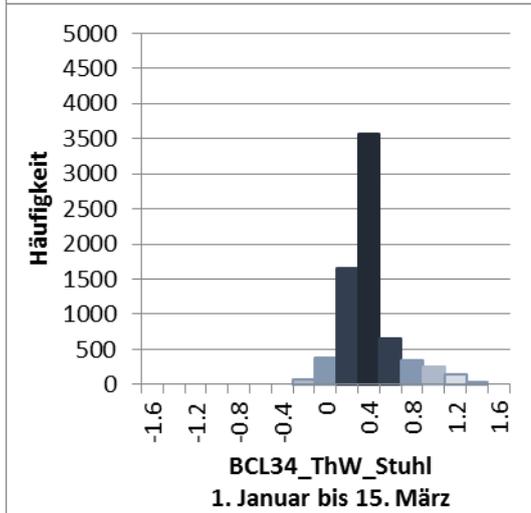
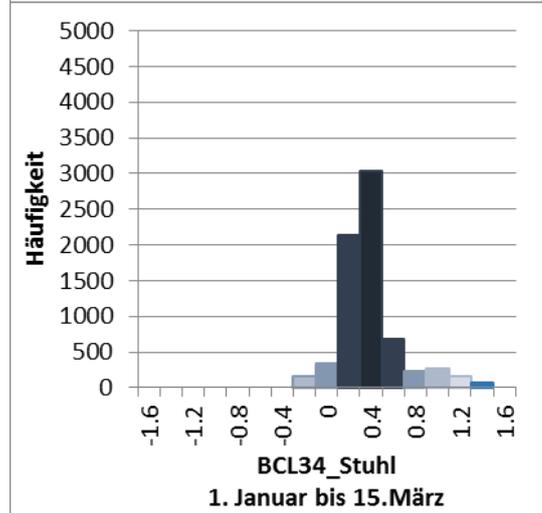
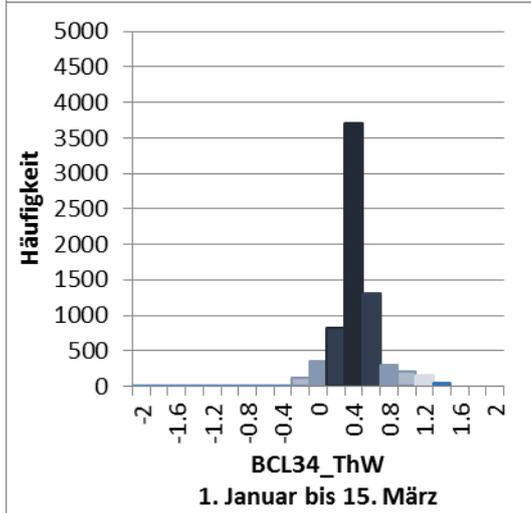
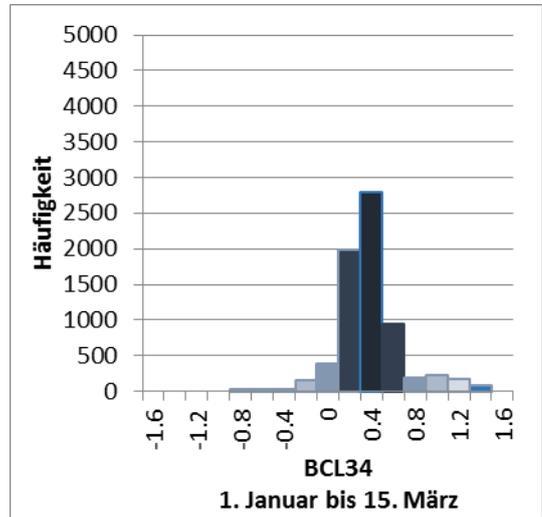
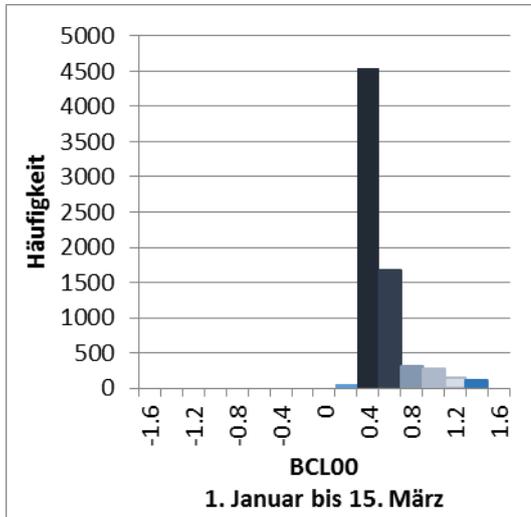


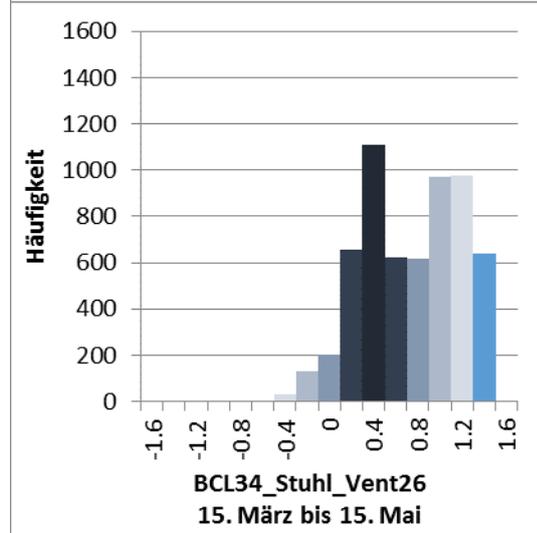
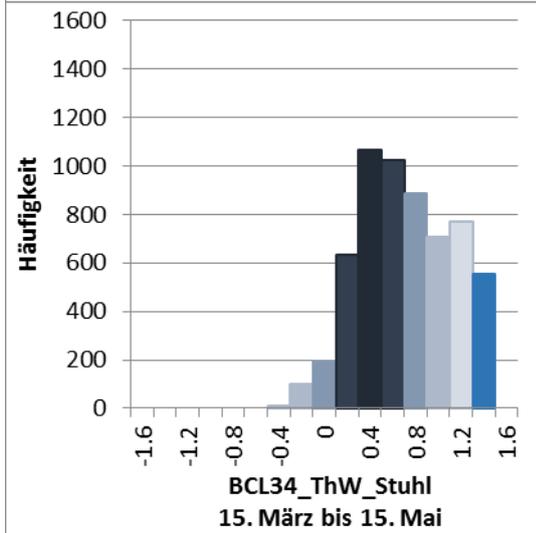
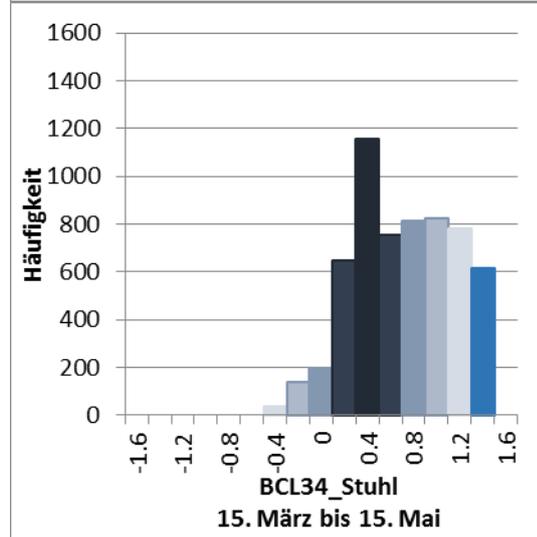
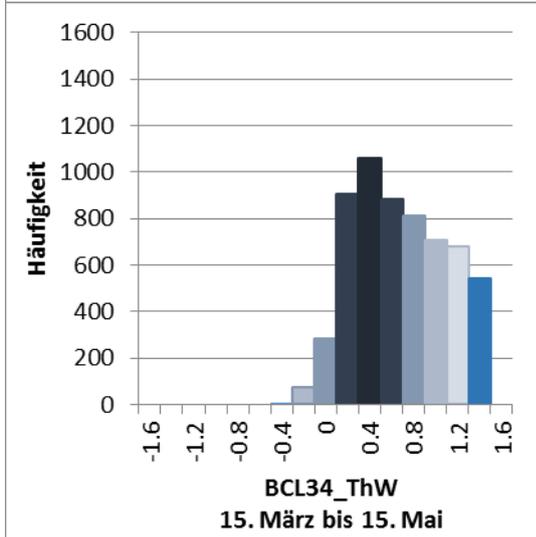
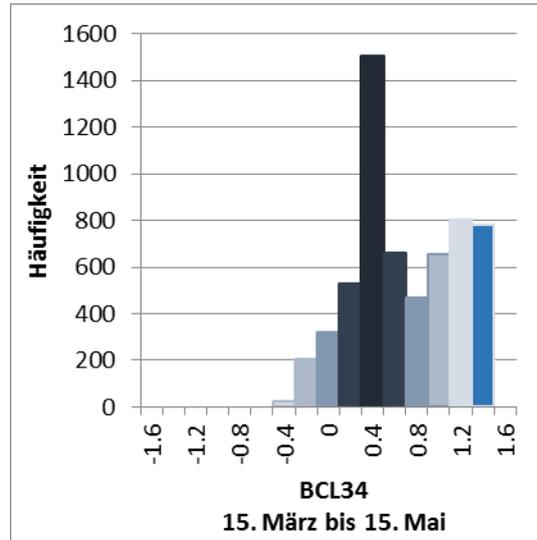
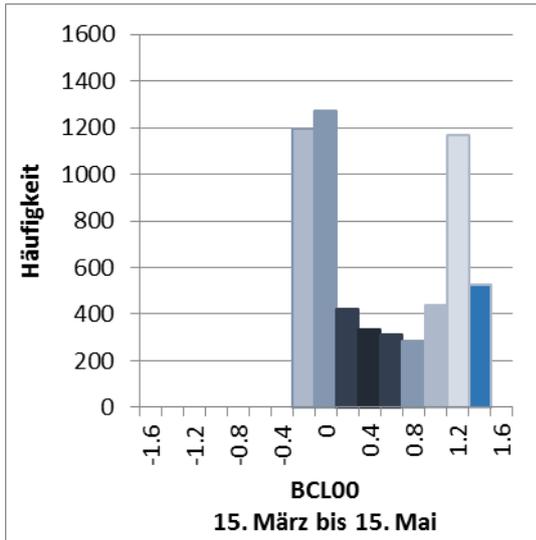
Abbildung 10-15: Solarstrahlung während der Simulationsperiode vom 15. Oktober bis zum 31. Dezember

# Anhang C Histogramme: Behaglichkeitswerte der verschiedenen Gebäuderegler

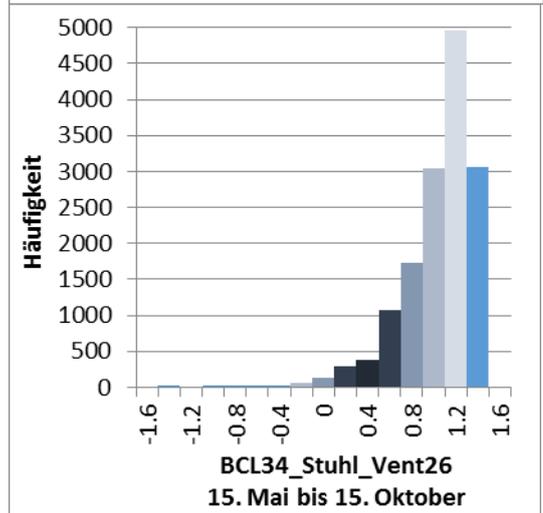
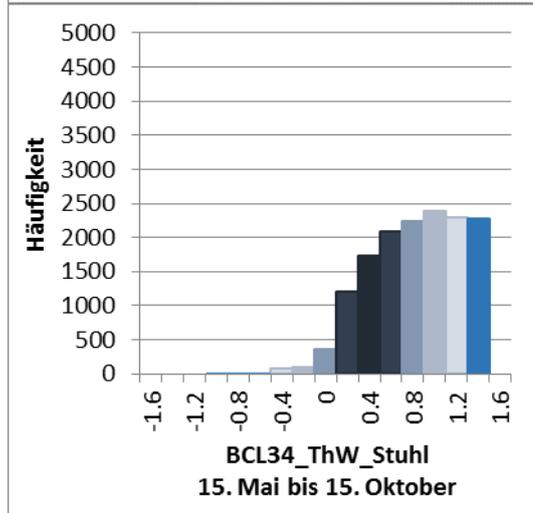
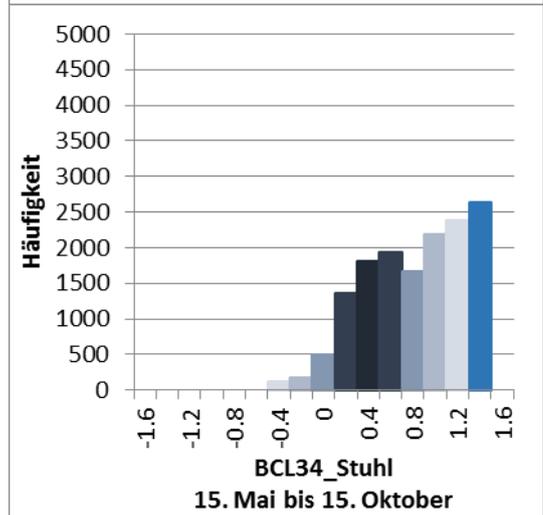
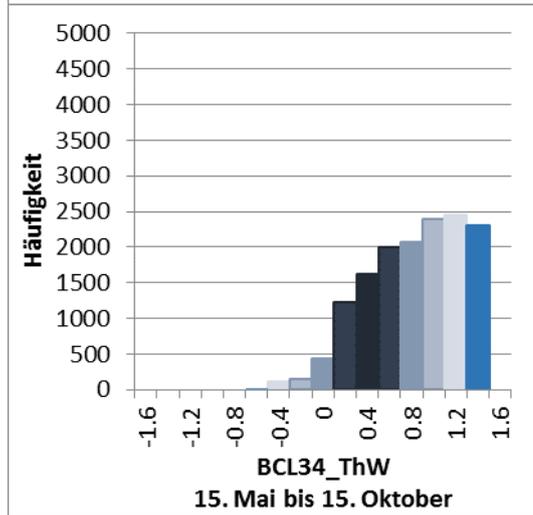
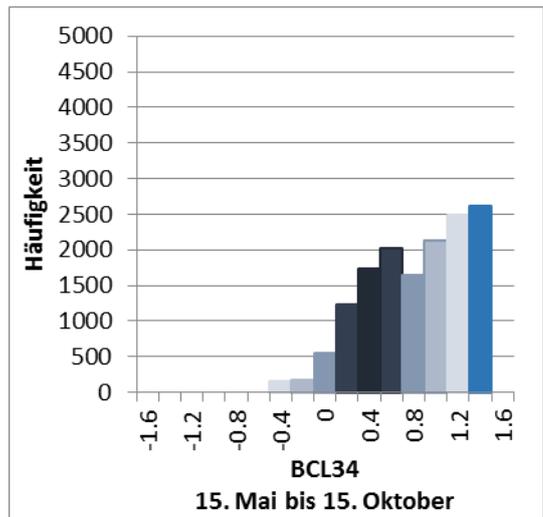
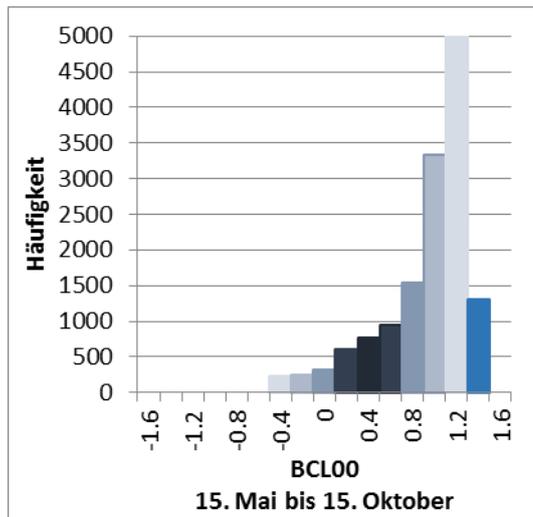
1. Januar bis 15. März



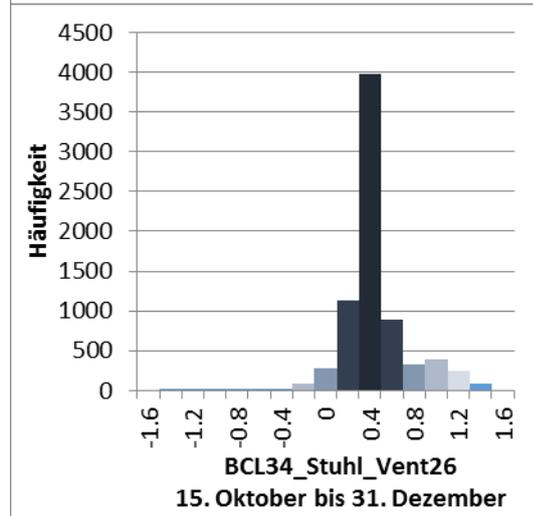
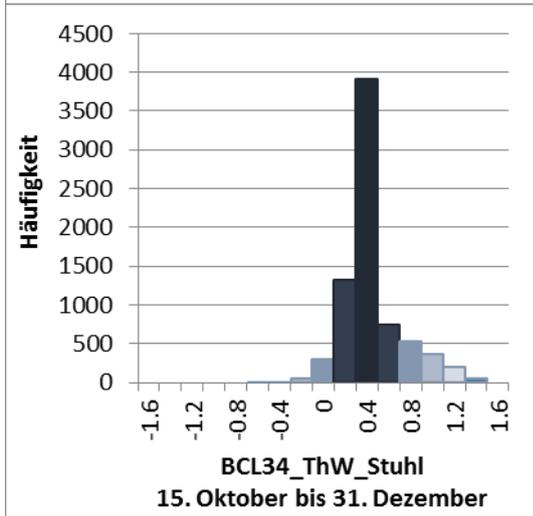
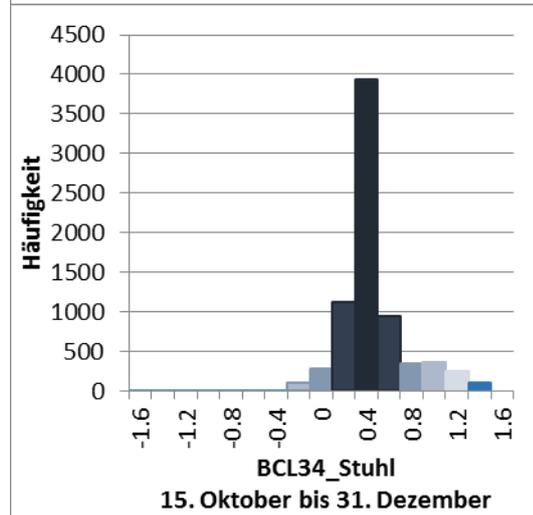
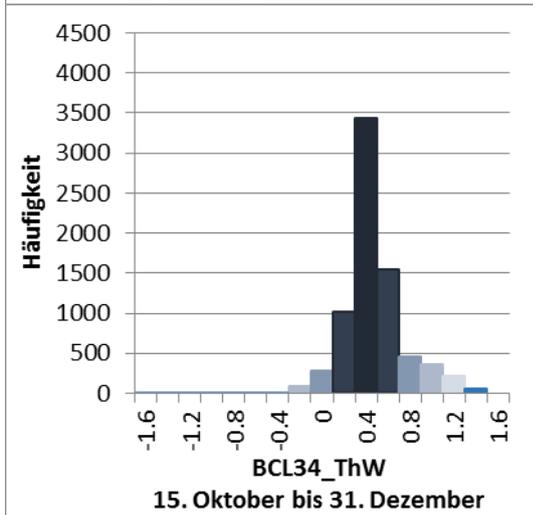
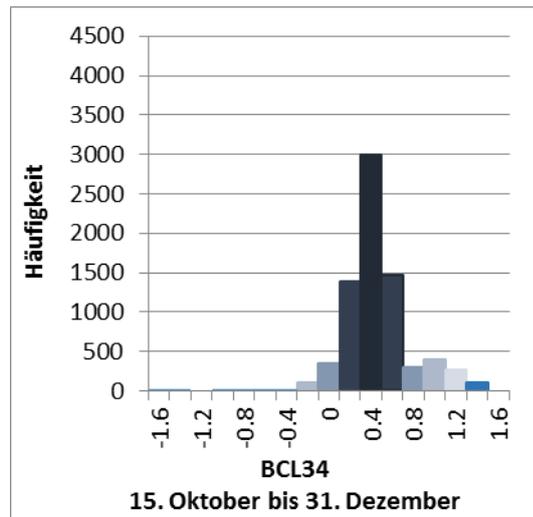
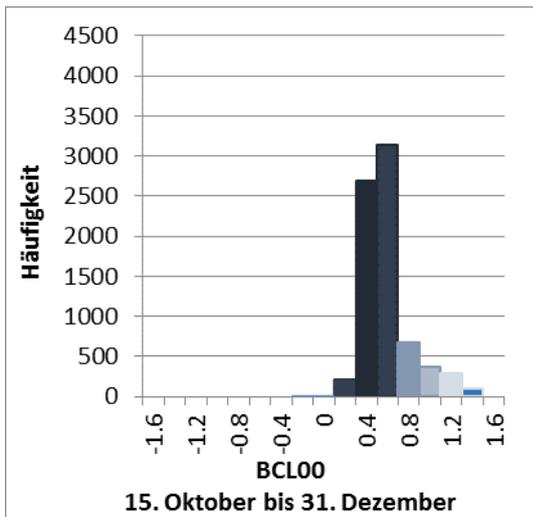
15. März bis 15. Mai



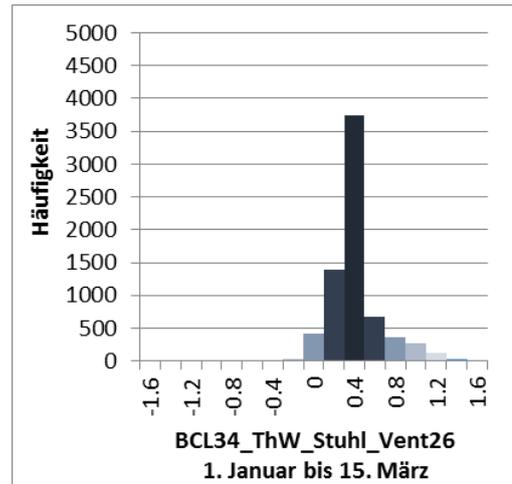
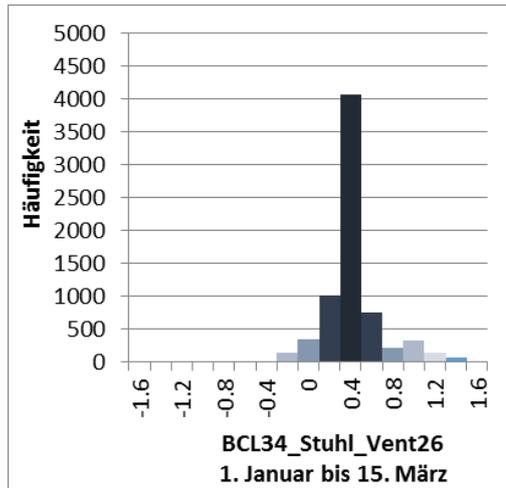
15. Mai bis 15. Oktober



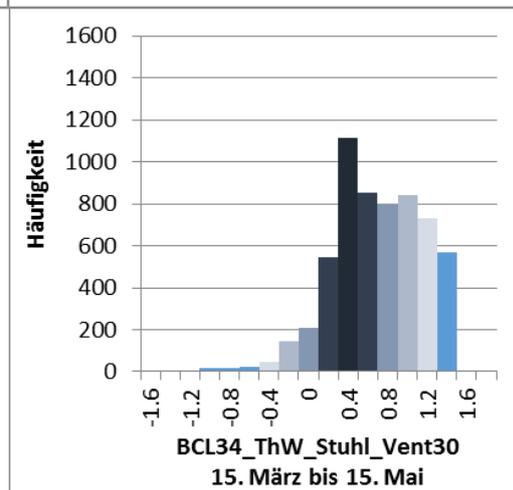
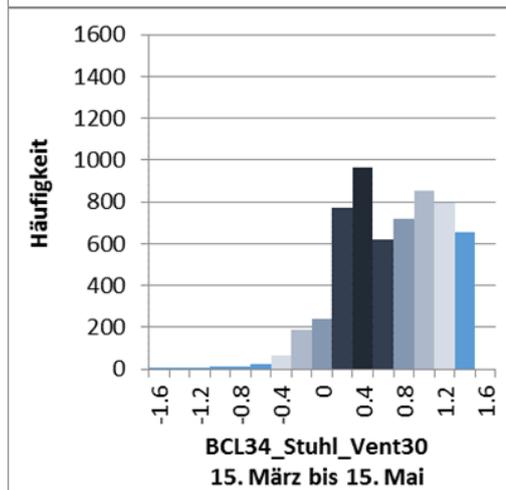
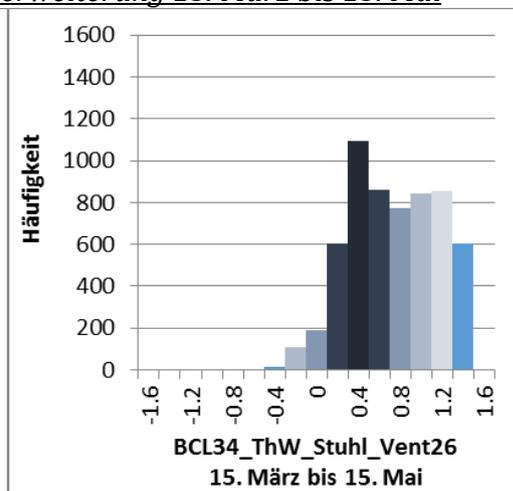
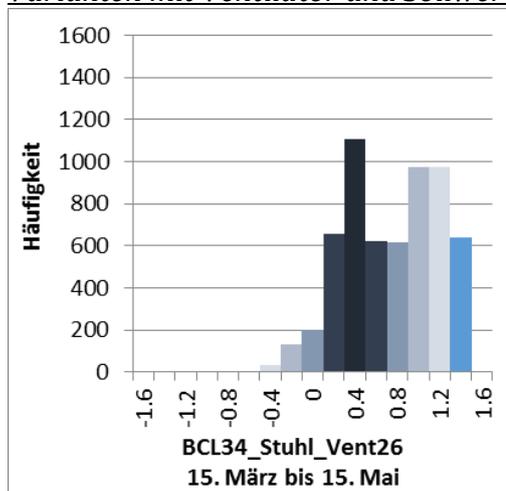
15. Oktober bis 31. Dezember



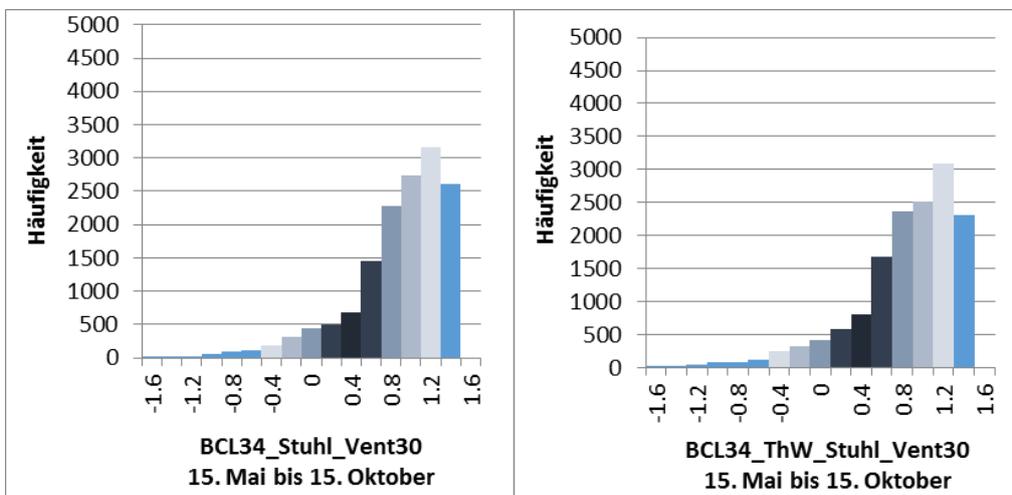
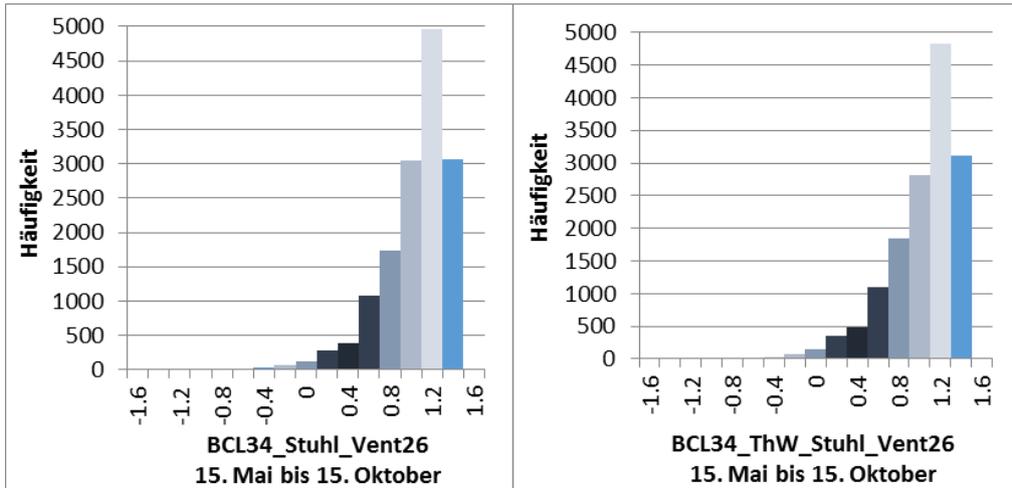
Varianten mit Ventilator 01. Januar bis 15. März



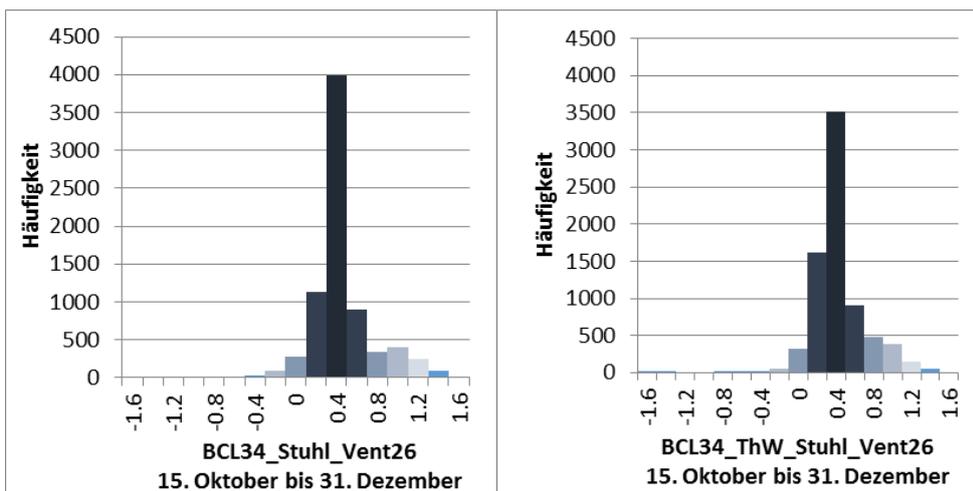
Varianten mit Ventilator und Sollwerterweiterung 15. März bis 15. Mai



Varianten mit Ventilator und Sollwerterweiterung 15. Mai bis 15. Oktober



Varianten mit Ventilator 15. Oktober bis 31. Dezember



## Anhang D Diagramme zur weiteren Erläuterung

Folgende Abbildung vergleicht den Einsatz der adaptiven Varianten mit Ventilator (BCL34\_ThW\_Stuhl\_Vent) mit einem Sollwert von  $TU = 26\text{ °C}$  und  $TU = 30\text{ °C}$ .

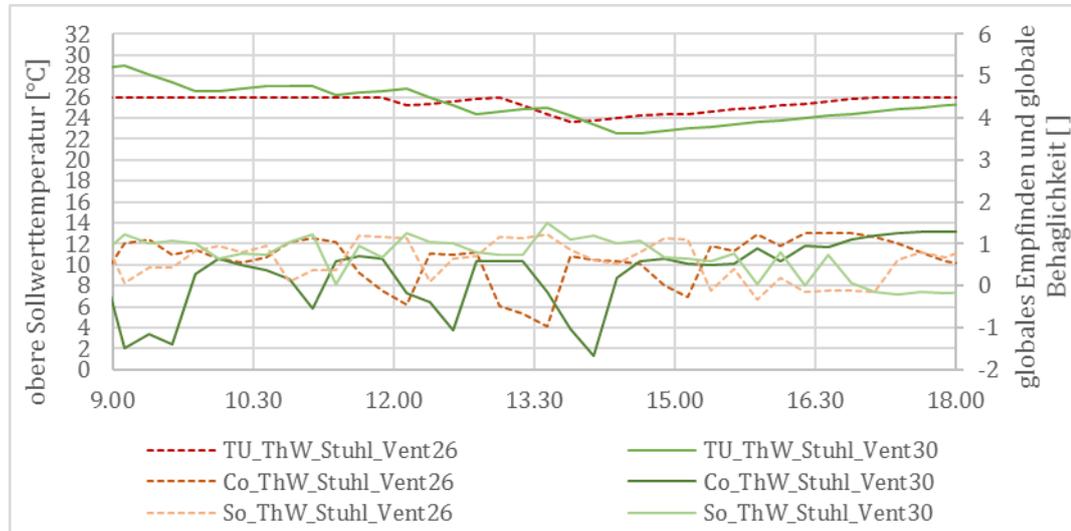


Abbildung 10-16: Auswirkung der Varianten des adaptiven Reglers BCL34\_ThW\_Stuhl\_Vent mit einem Sollwert von  $TU = 26\text{ °C}$  und  $TU = 30\text{ °C}$  auf den oberen Sollwert TU, die globale Behaglichkeit  $C_o$  und das globale Empfinden  $S_o$  für eine Tagessimulation im August für Mannheim

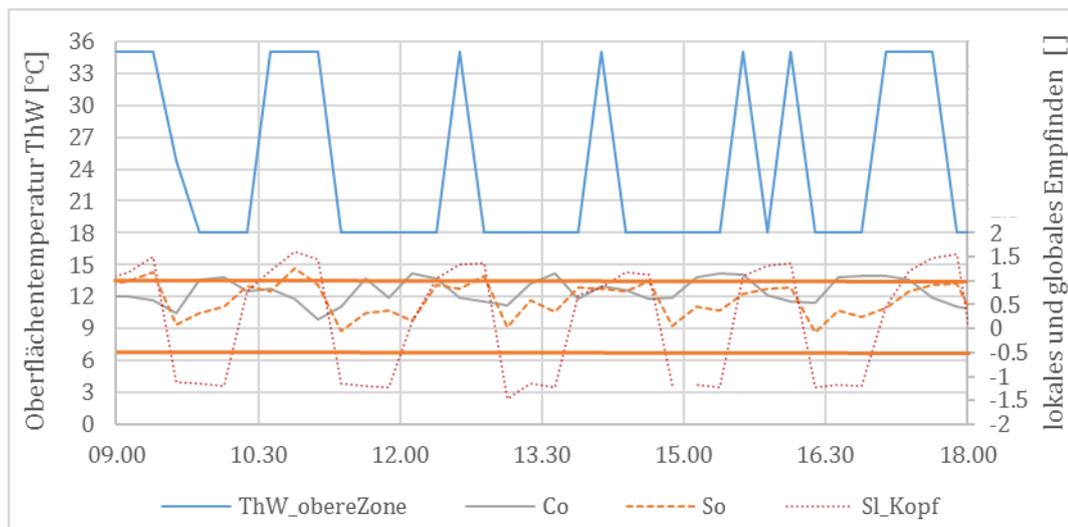


Abbildung 10-17: Gemeinsame Nutzung von thermoelektrischer Heiz- und Kühlwand sowie Ventilator innerhalb der Variante des adaptiven Reglers BCL34\_ThW\_Stuhl\_Vent mit einem Sollwert von  $TU = 26\text{ °C}$ , während eines Sommertages am 28. Juni in Mannheim,

Die Abbildung zeigt die Aktivierung der oberen Zone der thermoelektrischen Stellwand (ThW\_obereZone) und Empfindungswerte für das globale Empfinden ( $S_o$ ), das lokale Empfinden des Kopfes ( $S_{I\_Kopf}$ ) und die globale Behaglichkeit ( $C_o$ ). Die globale Behaglichkeit liegt während diesem gezeigten Tag im Juni im positiven Bereich. Mehrmals wird die obere Zone zum Kühlen genutzt. Dabei wird die Oberflächentemperatur der oberen Zone auf  $18\text{ °C}$  reguliert. Liegt das globale Empfinden

im markierten Bereich (orangene Linien) zwischen - 0,5 und 1,0 wird die obere Zone durch das lokale Empfinden des Kopfes reguliert. Die Aktivierung wird im nächsten Simulationszeitschritt sichtbar. Ab einem lokalen Empfindungswert unter - 0,5 wird die Zone zum Heizen (Oberflächentemperatur 35 °C) genutzt, ab einem Wert über 0,5 zum Kühlen (Oberflächentemperatur 18 °C). In dieser Simulation wird das alternierende An-/Aussschalten durch die Nutzung des Ventilators, der die Kopfregion beeinflusst, aktiviert.

Es ist sichtbar, dass das lokale Empfinden nach der Nutzung des Ventilators oft im Bereich eines lokalen Empfindungswertes von - 1,2 liegt. Dadurch wird die obere Zone der thermoelektrischen Stellwand über das lokale Empfinden des Kopfes noch einmal zum Heizen genutzt, falls das lokale Empfinden noch unterhalb des Grenzwertes liegt.

## Nomenklatur

Symbol	Beschreibung	Einheit
$A$	Oberfläche	$[m^2]$
$A_{cli}$	Oberflächenbereich des bekleideten Manikins	$[m^2]$
$A_D$	DuBois Oberfläche	$[m^2]$
$A_{ni}$	Oberflächenbereich des unbekleideten Manikins	$[m^2]$
$BC(i,j)$	Wärmestrom zwischen den Knoten und dem zentralen Blutknoten	$[W]$
$Bf(i,j)$	Basale Blutstromrate	$[l/h]$
$C_{i,j}$	Wärmekapazität der einzelnen Körperteile (i) und Schichten (j) $[kJ/(kg \cdot K)]$	$[kJ/(kg \cdot K)]$
$C$	Wärmeverluste durch Konvektion	$[W/m^2]$
$Cd(i,j)$	Wärmeleitung zwischen den Schichten (j) eines Körperteils (i)	$[W]$
$c_{p,b}$	Spezifische Wärmekapazität des Körpers	$[kJ/(kg \cdot K)]$
$C_{res}$	Konvektive Wärmeverluste durch Atmung	$[W/m^2]$
$Cond(i,j)$	Thermische Leitfähigkeit	$[W/mK]$
$E_{dif}, EDIF$	Wasserdampfdiffusion	$[W/m^2]$
$E_{Haut}(i)$	Wärmeverluste der Haut	$[W][W/m^2]$
$E_{max}$	Maximale Wärmeverluste durch Evaporation	$[W][W/m^2]$
$E_{res}, E_{rsw}$	Evaporative Wärmeverluste durch Atmung	$[W/m^2]$
$E_{sk}$	Evaporative Wärmeverluste der Hautschicht	$[W/m^2]$
$f_{cl}$	Bekleidungsflächenfaktor	$[-]$
$F_{p-N}$	Sichtfaktor zwischen den Flächen p und N	$[-]$
$h$	Enthalpie	$[kJ/kg]$
$h_c$	Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient	$[W/m^2K]$
$he(i)$	Verdunstungs-Wärmeübertragungskoeffizient	$[W/(m^2KPa)]$
$hi$	Wärmeübergangskoeffizient, berücksichtigt den Bekleidungsisolationsfaktor der Grenzluftschicht zwischen Hautoberfläche und Bekleidung	$[W/m^2K]$
$h_r$	Strahlungswärme Übergangskoeffizient	$[W/m^2K]$
$hti$	Gesamter Wärmeübergangskoeffizient	$[W/m^2K]$
$I_a$	Isolation der Grenzluftschicht	$[clo]$
$I_{cl}$	Intrinsische Bekleidungsisolations [clo]	$[clo]$
$i_{cl}$	Feuchtigkeits-Permeabilitätsindex der Bekleidung	$[-]$
$I_t$	Thermische Bekleidungsisolations	$[clo]$
$LR$	Lewis-Verhältnis	$[K/kPa]$
$l$	Körperlänge	$[m]$
$M$	Energieumsatz	$[W/m^2]$
$m$	Körpergewicht	$[kg]$
$P$	Strahlungsleistung	$[W]$
$p_a$	Wasserdampfpartialdruck	$[kpa]$
$P_a(i)$	Maximaler Sättigungsdruck an der Haut	$[kpa]$
$P_s(i)$	Maximaler Sättigungsdruck der Umgebung	$[kpa]$
$Q_b(i,j)$	Metabolische Wärmerate	$[W]$
$R$	Wärmeverluste durch Strahlung	$[W/m^2]$
$R_{cl}$	Bekleidungswiderstand	$[m^2K/W]$

$R_{e,cl}$	Evaporativer Bekleidungswiderstand	[m <sup>2</sup> K/W]
$Res$	Wärmeverluste durch Atmung	[W/m <sup>2</sup> ]
$Sarea$	Körperteiloberfläche	[m <sup>2</sup> ]
$S_{cr}$	Wärmespeicherrate der Kernschicht	[W/m <sup>2</sup> ]
$S_{sk}$	Wärmespeicherrate der Hautschicht	[W/m <sup>2</sup> ]
$T^4$	Temperatur	[K]
$T(i,j)$	Knotentemperaturen	[°C]
$t_a$	Lufttemperatur	[°C]
$t_{b,c}$	Unterer Temperatursollwert für Evaporation	[°C]
$t_{b,h}$	Oberer Temperatursollwert für Evaporation	[°C]
$T_{blut}$	Temperatur des Blutes	[°C]
$t_c$	Behagliche Temperatur nach dem adaptiven Ansatz	[°C]
$t_{cl}$	Oberflächentemperatur der Bekleidung	[°C]
$t_{cr}$	Temperatur der Kernschicht	[°C]
$T_N$	Oberflächentemperatur der Fläche N	[K]
$T_o$	Operative Temperatur	[°C]
$t_{oc}$	Operative Behaglichkeitstemperatur nach dem adaptiven Ansatz	[°C]
$t_{out}$	Monatliche Außentemperaturen	[°C]
$\bar{T}_r$	Mittlere Strahlungstemperatur	[K]
$\bar{t}_r$	Mittlere Strahlungstemperatur	[°C]
$T_{set}(i,j)$	Knoten-Sollwerttemperatur	[°C]
$t_{sk}$	Temperatur der Hautschicht	[°C]
$T_{s,mean}$	Mittlere Körpertemperatur	[°C]
$T_{s,mean,set}$	Sollwert der mittleren Körpertemperatur	[°C]
$v_{ar}$	Relative Luftgeschwindigkeit	[m/s]
$v_{rel}$	Relative Luftgeschwindigkeit	[m/s]
$W$	mechanische Leistung	[W/m <sup>2</sup> ]
$x$	Wasserdampfmenge	[g/kg]
$x_s$	Sättigungsdampfmenge	[g/kg]
<b>Griechische Buchstaben</b>		
$\alpha_{sk}$	Anteilige Masse der Hautschicht	[-]
$\eta_{ev}$	Verdunstungseffizienz (0,85)	[-]
$\theta$	Zeit	[s]
$\varphi$	Relative Luftfeuchtigkeit	[% r.F]
$\sigma$	Stefan-Boltzmann Konstante	$\frac{W}{m^2K^4}$
<b>Sonstige Abkürzungen</b>		
$C2$	Koeffizient C2 für das lokale Empfinden	[-]
$C3$	Koeffizient C3 für das lokale Empfinden	[-]
$C_l$	Lokale Behaglichkeit (Comfort <sub>local</sub> )	[-]
$C_o$	Globale Behaglichkeit (Comfort <sub>overall</sub> )	[-]
$Chilf$	Verteilungsrate Kältezittern	[-]
$CHILL$	Kontroll-Signal für Zittern	[ ]
$DILAT$	Kontroll-Signal für Dilatation	[ ]
$ESIGNAL(i,j)$	Signale der Thermorezeptoren	[K]

<i>K1</i>	Koeffizient K1 für das lokale Empfinden	[-]
<i>Kalt(i,j)</i>	Signal für Kalt	[K]
<i>KALTs</i>	Zentrales Kaltsignal	[K]
<i>met</i>	Metabolisches Äquivalent	met
<i>metf</i>	Verteilung der Stoffwechselrate bezogen auf die Körperteile	[-]
<i>REA</i>	Anteil der latenten Wärmeleitfähigkeit der Bekleidung zur Umgebung	[m <sup>2</sup> Pa/W]
<i>RECL</i>	Anteil der latenten Wärmeleitfähigkeit der Hautoberfläche zur Bekleidungsfläche	[m <sup>2</sup> Pa/W]
<i>SKINC(i)</i>	Verteilungsanteil Vasokonstriktion der Körperteile (i)	[]
<i>Skinr(i)</i>	Verteilung der Warm und Kaltrezeptoren	[]
<i>SKINS</i>	Verteilung der Schweißrate der verschiedenen Körperteile	[]
<i>SKINV(i)</i>	Verteilungsanteil Vasodilation der Körperteile (i)	[]
<i>S<sub>l</sub></i>	Lokales Empfinden (Sensation <sub>local</sub> )	[-]
<i>S<sub>o</sub></i>	Globales Empfinden (Sensation <sub>overall</sub> )	[-]
<i>STRIC</i>	Kontroll-Signal für Vasokonstriktion	[]
<i>SWEAT</i>	Kontroll-Signal für Schwitzen	[]
<i>Warm(i,j)</i>	Signal für Warm	[K]
<i>WARMS</i>	Zentrales Warmsignal	[K]
<i>PMV</i>	Predicted Mean Vote, erwartete durchschnittliche Empfindung	[]
<i>PPD</i>	Predicted Percentage Dissatisfied, erwarteter Prozentsatz unzufriedener Personen	[]

## Literatur

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): Energieeffizienzstrategie Gebäude. Wege zu einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand, 2015.
- [2] dena Deutsche Energie-Agentur: dena-GEBÄUDEREPORT KOMPAKT 2019. Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand. <https://www.dena.de/themenprojekte/projekte/gebaeude/dena-gebaeudereport/>.
- [3] Müller, Christian, Deutsche Energie-Agentur (dena): Rolle der Digitalisierung im Gebäudebereich - Eine Analyse von Potenzialen, Hemmnissen, Akteuren und Handlungsoptionen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, BMWi-Projekt-Nr.: 102/16-13, 2018.
- [4] Graham, L. t.; Parkinson, T.; Schiavon, S.: Lessons learned from 20 years of CBE's occupant surveys. *Buildings and Cities* 2 (2021), Heft 1, S. 166–184.
- [5] Z. Wang; R. Dear; Maohui Luo et al.: Individual difference in thermal comfort: A literature review. *Building and Environment* 138 (2018), S. 181–193.
- [6] Hellwig, R. T.: Perceived control in indoor environments: a conceptual approach. *Building Research & Information* 43 (2015), Heft 3, S. 302–315.
- [7] Hoyt, T.; Arens, E.; Zhang, H.: Extending air temperature setpoints. Simulated energy savings and design considerations for new and retrofit buildings. *Building and Environment* 88 (2015), S. 89–96.
- [8] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.: 2013 ASHRAE handbook : fundamentals, 2013.
- [9] Yufeng Zhang; Rongyi Zhao: Effect of local exposure on human responses. 1st International Symposium on Sustainable Healthy Buildings 42 (2007), Heft 7, S. 2737–2745.
- [10] Duden: Behaglich. <https://www.duden.de/rechtschreibung/behaglich> (Abruf: 02.10.2018).
- [11] Oxford Living Dictionaries: Comfort. <https://en.oxforddictionaries.com/definition/comfort> (Abruf: 02.10.2018).
- [12] Standard 55-2013 user's manual. ANSI/ASHRAE standard 55-2013, thermal environmental conditions for human occupancy. ASHRAE Research, Atlanta, GA, 2016.
- [13] Benzinger, T. H.; Mayer, E.: Definition der thermischen Behaglichkeit. Fraunhofer-Institut für Bauphysik: iBP-Mitteilung, Heft 115, 1986.
- [14] DIN EN ISO 7730:2006-05: Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005.
- [15] DIN EN ISO 14505-2:2007-04: Ergonomie der thermischen Umgebung - Beurteilung der thermischen Umgebung in Fahrzeugen - Teil 2: Bestimmung der Äquivalenttemperatur (ISO 14505-2:2007); Deutsche Fassung EN ISO 14505-2:2007.
- [16] ASHRAE 55: Thermal environmental conditions for human occupancy. <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>.
- [17] ASHRAE (Hrsg.): Standard 55. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, 2004.
- [18] ANSI/ASHRAE Standard 55-2010: ASHRAE Standard.

- [19] Hoyt, T.; Schiavon, S.; Piccioli, A. et al.: CBE Thermal Comfort Tool. <http://comfort.cbe.berkeley.edu/> (Abruf: 26.02.2018).
- [20] ASHRAE (Hrsg.): ANSI/ASHRAE Standard 55-2013. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, 2013.
- [21] Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie, Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr: Hinweise zum Energiesparen. Merkblatt 10, Raumklima und Behaglichkeit.
- [22] Rietschel, H.; Esdorn, H.: Raumklimotechnik. Band 1: Grundlagen. Raumklimotechnik / Rietschel [Begr.], Bd. 1. Springer, Berlin [u.a.], 2008.
- [23] Frank, W.: Raumklima & thermische Behaglichkeit. Berichte aus der Bauforschung (1975), Heft 104.
- [24] Siemens: Das h,x-Diagramm. Aufbau und Anwendung, Building Technologies. [www.siemens.com/buildingtechnologies](http://www.siemens.com/buildingtechnologies) (Abruf: 09.01.2018).
- [25] Dentel, A.; Dietrich, U.: Thermische Behaglichkeit-Komfort in Gebäuden. Dokumentation Primero-Komfort. Hamburg, HafenCity Universität, Institut für Energie und Gebäude (2013).
- [26] G.U.N.T. Gerätebau GmbH: Grundlagen der Klimatechnik. <https://www.gunt.de/de/services/download>.
- [27] Arens, E. A.; Zhang, H.: The skin's role in human thermoregulation and comfort. Thermal and Moisture Transport in Fibrous Materials (2006), S. 560–602.
- [28] Karasek, H.; Merbold, U.: Mensch und Körper. 1000 Fragen und Antworten. Bild-Wissensbibliothek, das grosse Volks-Lexikon / Bertelsmann-Lexikon-Institut. Red. Leitung: Florian von Heintze. Hrsg. von Hellmuth Karasek und Ulf Merbold ; 6. Wissen-Media-Verl., Gütersloh, 2006.
- [29] Medizin Kompakt: Thermorezeptor. <https://www.medizin-kompakt.de/thermorezeptor>.
- [30] Biesalski, H.-K.; B. Stähelin, H.; Fürst, P. et al.: Ernährungsmedizin. THIEME, s.l., 2004.
- [31] Fountain, M.; Huizenga, C.: A Thermal Sensation Model For Use By The Engineering Profession. Results of Cooperative Research Between The American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers, Inc. and Environmental Analytics. eScholarship, University of California, 1995.
- [32] Brandes, R.; Lang, F.; Schmidt, R. F.: Physiologie des Menschen. Mit Pathophysiologie. Springer-Lehrbuch, 2019.
- [33] Kramme, R.: Medizintechnik. Verfahren - Systeme - Informationsverarbeitung. Springer, Dordrecht, 2007.
- [34] McCullough, E. A.; Jones, B. W.: A comprehensive Data Base for estimating clothing insulation. Final project report ; ASHRAE 411-RP. Technical report / Institute for Environmental Research, Kansas State University, 84-01. Manhattan, Kans., 1984.
- [35] ASHRAE (Hrsg.): ASHRAE Handbook, Fundamentals, Thermal comfort, 2009.
- [36] DuBois, D. F.: A formula to estimate the approximate surface area if height and body mass be known. Arch Intern Med 17 (1916), S. 863–871.
- [37] Scott, R. A.: Textiles for Protection. Elsevier Science, 2005.
- [38] Woodcock, A. H.: Moisture Transfer in Textile Systems, Part I. Textile Research Journal 32 (1962), Heft 8, S. 628–633.
- [39] ASHRAE (Hrsg.): ASHRAE Handbook - Fundamentals. SI-Edition. Atlanta, 2005.

- [40] Olesen Bjarne W.: The history of international standardization for the ergonomics of the thermal environment. In: conference proceedings ICHES2016 Nagoya.
- [41] Eckart, W. U. (Hrsg.): *Ärzte-Lexikon. Von der Antike bis zur Gegenwart*. Springer E-book Collection. Springer, Berlin, 2006.
- [42] Tipton, C. M. (Hrsg.): *History of exercise physiology*. Human Kinetics, Champaign, IL, 2014.
- [43] Gagge, A. P.; Burton, A. C.; Bazett, H. C.: A Practical System of Units for the Description of the Heat Exchange of Man with his Environment. *Science (Washington)* (1941), S. 428–430.
- [44] Katić, K.; Li, R.; Zeiler, W.: Thermophysiological models and their applications: A review. *Building and Environment* 106 (2016), S. 286–300.
- [45] Givoni, B.; Goldman, R. F.: Predicting metabolic energy cost. *J Appl Physiol* 30 (1971), Heft 3, S. 429.
- [46] Cheng, Y.; Niu, J.; Gao, N.: Thermal comfort models: A review and numerical investigation. *International Workshop on Ventilation, Comfort, and Health in Transport Vehicles* 47 (2012), S. 13–22.
- [47] Gagge, A. P.; Stolwijk, J.; Nishi Y.: An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE Transactions* 77 (1971), S. 247–262.
- [48] Gagge, A. P.; Burton, A. C.; Bazett, H. C.: A practical system of units for the description of the heat exchange of man with his environment, 1941.
- [49] Stolwijk, J.: A mathematical model of physiological temperature regulation in man. NASA Contractor report, NASA CR-1855. Washington, D.C, 1971.
- [50] Huizenga, C.; Zhang; Hui et al.: A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments. *Building and Environmental Performance Simulation: Current State and Future Issues*. *Building and Environment* 36 (2001), Heft 6, S. 691–699.
- [51] Tanabe, S.; Kobayashi, K.; Nakano, J. et al.: Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD). *Special Issue on Thermal Comfort Standards* 34 (2002), Heft 6, S. 637–646.
- [52] Fiala, D.; Lomas, K. J.; Stohrer, M.: A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system. *Journal of Applied Physiology* 87 (1999), Heft 5, S. 1957–1972.
- [53] Fiala, D.; Lomas, K. J.; Stohrer, M.: Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. *International Journal of Biometeorology* 45 (2001), Heft 3, S. 143–159.
- [54] Fiala, D.: First Principles Modeling of Thermal Sensation Responses in Steady State and Transient Conditions. *ASHRAE Transactions* (2002).
- [55] Lomas, K. J.; Fiala, A. D.; Stohrer, M.: First principles modeling of thermal sensation responses in steady-state and transient conditions. *ASHRAE Transactions* (2003), S. 79–187.
- [56] Fiala, D.; Havenith, G.; Brode, P. et al.: UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *International Journal of Biometeorology* 56 (2012), Heft 3, S. 429–441.
- [57] Fiala, D.; Havenith, G.: Modelling Human Heat Transfer and Temperature Regulation. In: Gefen, A.; Epstein, Y. (Hrsg.): *The Mechanobiology and Mechanophysiology of Military-Related Injuries*, S. 265–302. Springer International Publishing, Cham, 2016.

- [58] Fiala, D.; Psikuta, A.; Jendritzky, G. et al.: Physiological modeling for technical, clinical and research applications. *Frontiers in bioscience (Scholar edition)* 2 (2010), S. 939–968.
- [59] thermoanalytics: TAI. Human Thermal Module. <http://www.thermoanalytics.com/products/human-thermal/thermoregulation> (Abruf: 04.10.2017).
- [60] CBE, Center for the Built Environment: Advanced Human Thermal Comfort Model.
- [61] Tanabe, S.; Horikawa, S.; M. Kin et al.: Comparison of physiological values calculated by a 65 node thermoregulation-model with subjective experiments. *Proceedings of SHASE (1998)*, S. 989–992.
- [62] Kobayashi, Y.; Tanabe, S.: Development of JOS-2 human thermoregulation model with detailed vascular system. *Building and Environment* 66 (2013), S. 1–10.
- [63] Lars Walløe: Arterio-venous anastomoses in the human skin and their role in temperature control. *Temperature* 3 (2016), Heft 1, S. 92–103.
- [64] Medizin Kompakt: Anatomie. Arteriovenöse Anastomose. <https://www.medizin-kompakt.de/arteriovenoese-anastomose>.
- [65] Wissler, E. H.: A mathematical model of the human thermal system. *Bulletin of mathematical biophysics* 26 (1964), Heft 26, 147–145.
- [66] Pisacane, V. L.; Kuznetz, L. H.; Logan, J.S., Clark MD, J.B. et al.: Use of Thermoregulatory Models to Enhance Space Shuttle and Space Station Operations and Review of Human Thermoregulatory Control. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20070022493.pdf> (Abruf: 21.02.2017).
- [67] Cognata, T.: Results from the 3-D Wissler Human Thermal Model for a Space Suit and PLSS in representative exploration environments. In: *46th International Conference on Environmental Systems*. Vienna, Austria, 2016.
- [68] Gagge, A. P.: Chapter 5 Rational Temperature Indices of Thermal Comfort. *Studies in Environmental Science* 10 (1981), S. 79–98.
- [69] Gagge, A. P.; Stolwijk, J.; Hardy, J. D.: Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures. *Environmental Research* 1 (1967), Heft 1, S. 1–20.
- [70] Houghton FC; Yaglou CP: Determining equal comfort lines. *J Am Soc Heat Vent Eng* 29 (1923), S. 165–176.
- [71] Grün, G.: Modellierung eines Komfortindex zur Beurteilung des Raumklimas am Beispiel der Passagierflugzeugkabine. *Forschungsergebnisse aus der Bauphysik*, Heft 1. Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2009.
- [72] Vernon, H. M.; Warner, C. G.: The Influence of the Humidity of the Air on Capacity for Work at High Temperatures. *The Journal of Hygiene* 32 (1932), Heft 3, S. 431–463.
- [73] Gagge, A. P.; Stolwijk J. A. J.; Nishi Y.: An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE Transactions* 77 (1970), Heft 1, S. 247–262.
- [74] Nishi Y.; Gagge, A. P.: Effective temperature scale useful for hypo- and hyperbaric environments. *Aviation, Space and Env. Medicine* (1977), Feb, S. 97.
- [75] Parsons, K. C.: *Human thermal comfort*. CRC Press/Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, 2020.
- [76] Fanger, P. O.: *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*. McGraw-Hill, New York, N.Y., 1970.

- [77] Zhang, H.; Arens, E.; Huizenga, C. et al.: Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: Part I: Local sensation of individual body parts. 1st International Symposium on Sustainable Healthy Buildings 45 (2010), Heft 2, S. 380–388.
- [78] Zhang, H.; Arens, E.; Huizenga, C. et al.: Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part II: Local comfort of individual body parts. 1st International Symposium on Sustainable Healthy Buildings 45 (2010), Heft 2, S. 389–398.
- [79] Zhang, H.; Arens, E.; Huizenga, C. et al.: Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part III: Whole-body sensation and comfort. 1st International Symposium on Sustainable Healthy Buildings 45 (2010), Heft 2, S. 399–410.
- [80] Gagge, A. P.; Fobelets, A. P.; Berglund, L.: A standard predictive index of human response to the thermal environment. ASHRAE Transactions 92 (2B) (1986), CONF-8606125-, S. 709–731.
- [81] Fiala, D.; Lomas, K. J.: The dynamic effect of adaptive human responses in the sensation of thermal comfort. Conference Proceedings: Moving Thermal Comfort Standards into the 21st Century, At Windsor, UK. In: S. 147–157.
- [82] Nicol, F.; Humphreys, M.: Adaptive Thermal Comfort and Sustainable Thermal Standards for Buildings 34 (2002), S. 563–572.
- [83] Nilsson, H. O.: Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models. Arbete och hälsa vetenskaplig skriftserie, NR 2004:2. National Institute for Working Life, Stockholm, 2004.
- [84] Humphreys, M.; Nicol, F.: Understanding the adaptive approach to thermal comfort. ASHRAE Technical Data Bulletin 14 (1998), Heft 1, S. 1–14.
- [85] Dear, J. R. de; Brager, G.: Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. ASHRAE Technical Data Bulletin 14, Heft 1, S. 27–49.
- [86] Cabanac, M.: Physiological role of pleasure. In: Science, Heft 4002, S. 1103–1107, 1971.
- [87] Zhang, H.; Arens, E.; Zhai, Y.: A review of the corrective power of personal comfort systems in non-neutral ambient environments. Fifty Year Anniversary for Building and Environment 91 (2015), S. 15–41.
- [88] Beausoleil-Morrison, I.: The adaptive coupling of heat and air flow modelling within dynamic whole-building simulation. Dissertation, University of Strathclyde, Energy Systems Research Unit, Glasgow, Scotland, 2000.
- [89] Clarke, J. A.: Environmental Systems Performance. Dissertation, University of Strathclyde, Glasgow, Scotland, 1977.
- [90] TRNSYS. Thermal Energy System Specialists, LLC.
- [91] EnergyPlus. National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- [92] EQUA Simulation AB: IDA ICE. EQUA.
- [93] THESEUS-FE: Virtual Human Thermoregulation Model for Thermal Comfort Simulation. <http://www.theseus-fe.com/simulation-software/human-thermal-model>.
- [94] Thellier, F.; Cordier, A.; MONCHOUX, F.: The analysis of thermal comfort requirement through the simulation of an occupied building. Ergonomics 37 (1994), S. 817–825.
- [95] Holopainen, R.: A human thermal model for improved thermal comfort. VTT science, Heft 23. VTT, Espoo, 2012.

- [96] Zhang, H.: Human thermal sensation and comfort in transient and non-uniform thermal environments. Ph.D. Thesis. University of California, Berkeley (USA), 2003.
- [97] Rida, M.; Kelly, N.; Cowie, A.: Integrating a human thermo-physiology model with a building simulation tool for better occupant representation. In: Proceedings of BauSIM 2018, 2018.
- [98] Voelker, C.: Entwicklung und messtechnische Validierung der Kopplung von CFD-Simulation mit einem thermophysiologicalen Modell zur Bestimmung der thermischen Behaglichkeit. PhD Thesis. Germany, 2011.
- [99] Streblow, R.; Mueller, D.; Gores, I. et al.: A COUPLED SIMULATION OF THE THERMAL ENVIRONMENT AND THERMAL COMFORT WITH AN ADAPTED TANABE COMFORT MODEL. 7th International Thermal Manikin and Modelling Meeting - University of Coimbra, September 2008.
- [100] Hoffmann, S.; Jedek, C.; Arens, E.: Assessing thermal comfort near glass facades with new tools, BEST 3 Building Enclosure Science, UC Berkeley, Center for the Built Environment, 2012.
- [101] Boudier, K.; Hoffman, S.: Modeling decentralized systems for energy savings based on detailed local thermal comfort calculations. In: Proceedings of IBPSA Italy Rome 2019. Rome, Italy, 2019.
- [102] Luo, M.; Arens, E.; Zhang, H. et al.: Thermal comfort evaluated for combinations of energy-efficient personal heating and cooling devices. Building and Environment 143 (2018), S. 206–216.
- [103] Luo, M.; Zhang, H.; Arens, E. et al.: Heating and cooling the human body with energy-efficient personal comfort systems (PCS), 2018.
- [104] Mishra, A.; Loomans, M.; Hensen, J.: Thermal comfort of heterogeneous and dynamic indoor conditions — An overview. Building and Environment 109 (2016).
- [105] Bauman, F.; Arens, E.: Task/ambient conditioning systems: Engineering and application guidelines. Series: Indoor Environmental Quality (IEQ). <https://escholarship.org/uc/item/0r36z48d>.
- [106] Bauman, F.; Zhang, H.; Arens, E. et al.: Advanced Integrated Systems Technology Development: Personal Comfort Systems and Radiant Slab Systems, 2015.
- [107] Boudier, K.; Hoffmann, S.: Komforterhöhung und Energieeinsparung im Büroumfeld durch Klimastühle. In: Tagungsband Bauphysiktage: Bauphysik in Forschung und Praxis, Kaiserslautern, Germany, Oktober 2015, 2015.
- [108] Hoffmann, S.; Boudier, K.: A new approach to provide thermal comfort in office buildings: A field study with heated and cooled chairs." In: Proceedings of Indoor Air Quality Ventilation & Energy Conservation in Buildings (IAQVEC), Incheon Songdo, Republic of Korea, October 2016, 2016.
- [109] Pasut, W.; Zhang, H.; Arens, E. et al.: Energy-efficient comfort with a heated/cooled chair. Results from human subject tests. Building and Environment 84 (2015), S. 10–21.
- [110] Zhang, H.; Arens, E.; Taub, M. et al.: Using footwarmers in offices for thermal comfort and energy savings. Special Issue on Thermal Comfort Standards 104 (2015), S. 233–243.
- [111] Zhang, H.; Arens, E.; Kim, D. et al.: Comfort, perceived air quality, and work performance in a low-power task–ambient conditioning system. International Symposium on the Interaction between Human and Building Environment Special Issue Section 45 (2010), Heft 1, S. 29–39.
- [112] Kimmling, M.; Hoffmann, S.: Development of a PV-powered thermoelectric partition for user-individual radiative cooling in office buildings. In: Proceedings of the World renewable energy conference (WREC), Jakarta, Indonesien, September 2016, 2016.

- [113] CBE Center for the Built Environment: Advanced Personal Comfort Systems Development and Testing. Providing local individual thermal comfort for occupant satisfaction and reduced energy consumption. <https://www.cbe.berkeley.edu/research/personal-comfort-systems.htm> (Abruf: 19.05.2017).
- [114] Boudier, K.; Hoffmann, S.: Heated and cooled chairs for office use. In: conference proceedings ICHES2016 Nagoya; October/November 2016, 2016.
- [115] raumweltenheiss: Klimastuhl. <http://raumweltenheiss.de/wp-content/uploads/2015/12/klimastuhl-bild1.png>.
- [116] Kim, J.; Bauman, F.; Raftery, P. et al.: Occupant comfort and behavior: High-resolution data from a 6-month field study of personal comfort systems with 37 real office workers. *Building and Environment* 148 (2019), S. 348–360.
- [117] Kimmling, M.; Hoffmann, S.: Influence of PV-powered thermoelectric surfaces for user-individual radiative cooling on the cooling energy demand of buildings. *Energy Procedia* 132 (2017), S. 15–20.
- [118] Kimmling, M.; Hoffmann, S.: Preliminary study of thermal comfort in buildings with PV-powered thermoelectric surfaces for radiative cooling. *Energy Procedia* 121 (2017), S. 87–94.
- [119] Spektrum der Wissenschaft: Peltier-Effekt. *Lexikon der Physik*. <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/peltier-effekt/11003> (Abruf: 05.04.2017).
- [120] Lauenroth, K.: Mensch-Gebäude-Interaktion. Persönliche, nutzerorientierte Kommunikationswege. Masterarbeit, TU Kaiserslautern, Kaiserslautern,, 2019.
- [121] Zhao, Y.; Zhang, H.; Arens, E. A. et al.: Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part IV. Adaptive neutral setpoints and smoothed whole-body sensation model. *Fifty Year Anniversary for Building and Environment* 72 (2014), S. 300–308.
- [122] ESRU: ESP-r. <https://github.com/ESP-rCommunity/ESP-rSource> (Abruf: 14.12.2018).
- [123] ESRU: The ESP-r System for Building Energy Simulation. User Guide Version 10 Series, ESRU Manual U02/1. Energy Systems Research Unit, University of Strathclyde, 2002.
- [124] JA Clarke (Hrsg.): *Energy Simulation in Building Design (Second Edition)*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2001.
- [125] Beausoleil-Morrison, I.: *The Adaptive Coupling of Heat and Air flow Modelling Within Dynamic Whole-Building Simulation*. Dissertation, University of Strathclyde, Energy Systems Research Unit, Department of Mechanical Engineering, Glasgow UK, 2000.
- [126] *Energy Simulation in Building Design*. Elsevier, 2001.
- [127] Ganji Kheybari, A.; Boudier, K.; Hoffmann, S.: Using a “MRT Manikin” To Assess Local and Overall Thermal Sensation and Comfort. In: *Proceedings of BauSIM 2018*, 2018.
- [128] Walton, G.: Calculation of Obstructed View Factors by Adaptive Integration. NISTIR 6925. NIST Interagency/Internal Report (NISTIR) November (2002).
- [129] Hand, J. W.: *Strategies for Deploying Virtual Representations of the Built Environment (aka The ESP-r Cookbook)*, 2015.
- [130] Semlitsch, B.: *Advanced Ray Tracing Techniques for Simulation of Thermal Radiation in Fluids*. MSc Thesis, TU Wien, Institut für Strömungsmechanik und Wärmeübertragung (E322), Wien, 2010.
- [131] Boudier, K.; Fiorentini, M.; Hoffmann, S. et al.: Coupling a thermal comfort model with building simulation for user comfort and energy efficiency. In: *Proceedings of the*

- Central European Symposium on Building Physics (CESBP) and BauSIM, Dresden, Germany, September 2016, S. 481–487, 2016.
- [132] Grasshopper, Algorithmic Modeling for Rhino: Comfort Mannequin. <https://rhino.github.io/components/ladybug/comfortMannequin.html> (Abruf: 09.07.2018).
- [133] Walton, G.; Pye, J.: View3D. <http://view3d.sourceforge.net/> (Abruf: 24.04.2018).
- [134] Schlobach, M.: Haustechnik verstehen. Der Unterschied zwischen Steuerung und Regelung. <https://www.haustechnikverstehen.de>.
- [135] Rida, M.; Hoffman, S.: Using a Dynamic Clothing Insulation Model in Building Simulation – Impact on Thermal Comfort and Energy Consumption. submitted. In: IBPSA Italy (Hrsg.): Conference Proceedings IBPSA Italy. Rome, Italy, 2019.
- [136] Zhai, Y.; Zhang, H.; Zhang, Y. et al.: Comfort under personally controlled air movement in warm and humid environments. *Building and Environment* 65 (2013), S. 109–117.
- [137] DIN 4108-2:2013-02, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden\_- Teil\_2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz.
- [138] DIN V 18599-10: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung -.
- [139] Huang, L.; Arens, E.; Zhang, H. et al.: Applicability of whole-body heat balance models for evaluating thermal sensation under non-uniform air movement in warm environments. *Building and Environment* 75 (2014), S. 108–113.
- [140] Veselý, M.; Zeiler, W.: Personalized conditioning and its impact on thermal comfort and energy performance – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 34 (2014), S. 401–408.
- [141] Peisch, P.: Automatische Temperierung von Büroräumen unter Berücksichtigung der individuellen Nutzerpräferenzen. Automated demand-driven tempering of office spaces. Masterthesis, TU Kaiserslautern, Kaiserslautern,, 2018.
- [142] Hoffman, S.; Tauscher, H.; Dengel, A. et al.: Sensing thermal stress at office workplaces. In: Proceedings of The Fifth International Conference on Human-Environment System (ICHES), Nagoya, Japan, October/November 2016.
- [143] Kimmling, M.; Hoffmann, S.: Behaglichkeitsmonitoring – flächendeckend und kostengünstig mit der Sensorstation CoMoS. *Bauphysik* 41 (2019), Heft 2, S. 111–119.

## **Eidesstaatliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich, Katharina Boudier, durch meine Unterschrift an Eides Statt, dass ich die Dissertation mit dem Titel: „Modellierung der Interaktion von Gebäudenutzer\*innen & Gebäudetechnik – Potenzialanalyse der thermischen Behaglichkeit und des Energieverbrauchs auf Basis eines adaptiven Gebäudereglers“ selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe verfasst habe.

Hierbei habe ich weder Textstellen von Dritten noch Grafiken oder sonstige Materialien ohne Kennzeichnung übernommen. Sämtliche wörtliche oder indirekte Zitate anderer Quellen sind gemäß den wissenschaftlichen Zitierregeln kenntlich gemacht.

Die benutzten Hilfsmittel sind in der Arbeit angegeben. Der Anteil anderer Mitarbeiter und eventueller Autoren ist klar gekennzeichnet. Es sind ausschließlich die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet worden.

Die Dissertation oder Teile davon wurden nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung eingereicht. Weiterhin wurde die Arbeit oder eine andere Abhandlung dieser noch nicht bei einem anderen Fachbereich oder einer anderen Universität als Dissertation eingereicht.

Ich versichere, dass meine Angaben der Wahrheit entsprechen und ich diese nach bestem Wissen und Gewissen gemacht habe.

Kaiserslautern, den

Boudier, Katharina

## **Lebenslauf**

### **Persönliche Daten**

Name: Katharina Boudier (geb. Rußer)  
Geburtsort: Neunkirchen (Saar)  
Staatsangehörigkeit: Deutsch

### **Beruflicher Werdegang**

03/20215 - 03/2021 Promotionsstipendiatin am Fachgebiet Gebäudesysteme und Gebäudetechnik, Fachbereich Bauingenieurwesen der Technischen Universität Kaiserslautern  
Seit 2014 Geschäftsführerin Vinerva UG Haftungsbeschränkt

### **Hochschulausbildung**

10/2009 - 01/2015 Studium Bauingenieurwesen an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) des Saarlandes, Fachbereich Bauingenieurwesen, Konstruktiver Ingenieurbau

### **Schulbildung**

07/2000- 07/2009 Cusanus Gymnasium in Sankt Wendel, Saarland