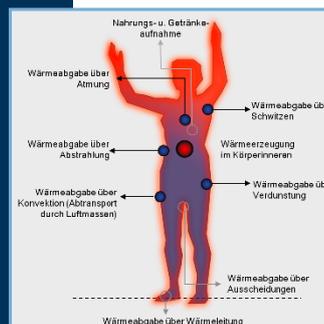


Peggy Freudenberg

Entwicklung und Kalibrierung einer Planungsmethode für Nichtwohngebäude mit besonderen raumklimatischen Anforderungen



Peggy Freudenberg

**Entwicklung und Kalibrierung einer
Planungsmethode für
Nichtwohngebäude mit besonderen
raumklimatischen Anforderungen**

Herausgeber:
Technische Universität Dresden
Zentrum für Bauforschung – Institut für Bauklimatik
01062 Dresden
Telefon +49 351 463 35259
Telefax +49 351 463 32627
URL http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_architektur/ibk

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
www.dnb.de abrufbar.

ISSN: 2365-9084
ISBN (Print): 978-3-8167-9594-0
ISBN (E-Book): 978-3-8167-9595-7

DE 2239
Zugl.: Dresden, TU, Diss., 2015

Herstellung: Gabriele Wicker
Umschlaggestaltung: Martin Kjer
Druck und Bindung: Mediendienstleistungen des
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Die hier zitierten Normen sind mit Erlaubnis des DIN Deutsches Institut für Normung e.V. wiedergegeben. Maßgebend für das Anwenden einer Norm ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, erhältlich ist.

Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

© **Fraunhofer IRB Verlag**, 2016
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon +49 711 970-2500
Telefax +49 711 970-2508
E-Mail irb@irb.fraunhofer.de
URL www.baufachinformation.de

Technische Universität Dresden

Dissertation

Entwicklung und Kalibrierung einer
Planungsmethode für
Nichtwohngebäude mit besonderen
raumklimatischen Anforderungen

Abhandlung zur Erlangung der Würde eines Doktor- Ingenieurs (Dr.- Ing.)

Fakultät Architektur

Peggy Freudenberg, geboren am 29.04.1982 in Eisenhüttenstadt

25. November 2015

Gutachter

1. Gutachter

Prof. Dr.- Ing. John Grunewald, TU Dresden

2. Gutachter

Prof. Dr. techn. Ardeshir Mahdavi, TU Wien

Diese Dissertation wurde durch den Europäischen Sozialfonds und den Freistaat Sachsen mit einem Promotionsstipendium gefördert.

Europa fördert Sachsen.



Until electricity comes from renewable sources of energy, air-conditioning should be reserved for special needs or extreme environments, rather than used to ameliorate the effects of poor climatic design of ordinary buildings.

(M. A. Humphreys, J.F. Nicol)

Vorwort

Den Anlass für die in der vorliegenden Arbeit behandelte Problematik bot die Kooperation des Instituts für Bauklimatik (IBK) mit dem Universitätsklinikum Dresden (UKD), Geschäftsbereich Bau und Technik. In den UKD- Gebäuden jüngeren Baujahres kommt es während der Sommermonate immer wieder zu Beschwerden der Patienten und Mitarbeiter über die unerträgliche Hitzeentwicklung in den Patientenzimmern. Diese sind auf Grund der Vorgaben des Sächsischen Immobilien- und Baumanagements (SIB), welches für diese öffentlichen Bauvorhaben als Bauherr für den Freistaat Sachsen fungiert, als frei klimatisierte Bereiche, d.h. ohne Kühlung, ausgeführt. Diese Vorgabe ist angesichts der aktuellen Klimapolitik von Bund und Ländern berechtigt. Sie kann jedoch nur vor dem Hintergrund allgemeingültiger und sicherer Anforderungen an den baulichen Sommerlichen Wärmeschutz umgesetzt werden. Eben daran mangelt es. Der für die erwähnten Gebäude erbrachte und obligatorische DIN- Nachweis konnte die Überhitzung dieser Räume nicht prognostizieren. Alternative Verfahren existieren zwar, doch ist auch deren Aussagekraft nicht belegt. Die vorliegende Arbeit befasst sich einerseits mit der Bewertung dieser Verfahren und andererseits mit der Erstellung einer allgemeingültigen Methodik für die Bemessung dieser Gebäude mittels Simulationsrechnungen. Darüber hinaus werden den Planern von Klinikbauten Entwurfshinweise für die bauliche Ausbildung der Patientenzimmer zur Hand gegeben.

Die vorliegende Arbeit wurde über einen Zeitraum von etwa vier Jahren, 2009 bis 2013, erstellt. Sie wurde durch ein Promotionsstipendium des Europäischen Sozialfonds (ESF) von 2009 bis 2011 sowie Sachmittel und Hilfestellungen des Universitätsklinikums Dresden (Finanzierung und Errichtung der Klimamessstation Blasewitzer Straße sowie der Raumesstechnik) und des Labors am Institut für Bauklimatik (Aufbau, Testlauf und Wartung der Klimamessstation) sowie durch die Unterstützung des IBK selbst (Bereitstellung der Arbeitsmittel, inhaltliche Betreuung) ermöglicht.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.- Ing. John Grunewald (Leiter des IBK, Professur für Bauphysik, TUD), Herrn Prof.(em) Dr.- Ing. Jürgen Roloff (IBK), Herrn Dipl.- Ing. Frank Meissner (IBK, Labor) und Herrn Dipl.- Ing. Holger Langer (UKD). Ebenso möchte ich Herrn Prof. Dr. techn. Ardeshir Mahdavi (Professur für Bauphysik und Bauökologie, Technische Universität Wien) herzlich für das Interesse an der Arbeit und die Bereitschaft zur Zweitbegutachtung der Arbeit danken.

Darüber hinaus gilt mein besonderer Dank meiner Familie und meinen Kollegen für ihre tatkräftige Unterstützung und ihre herzlichen und wohlwollenden Anregungen.

Notation

Symbol	Bedeutung	Einheit
A_{Body}	Hautoberfläche des menschlichen Körpers	m^2
A_{DuBois}	Effektive Abstrahlungsoberfläche des menschlichen Körpers	m^2
A_{Base}	Netto- Grundfläche eines Raumes	m^2
A_{Env}	An die Außenluft grenzende Netto- Hüllfläche eines Raumes	m^2
A_{NZ}	An eine anders temperierte Nachbarzone grenzende Netto- Hüllfläche eines Raumes	m^2
A_{Win}	Brutto- Fensterfläche eines Raumes (Rohbaufläche)	m^2
c_{Body}	Mittlere spezifische Wärmespeicherkapazität des menschlichen Körpers	$\frac{J}{kgK}$
c_{Blood}	Mittlere spezifische Wärmespeicherkapazität des menschlichen Körpers	$\frac{J}{kgK}$
c_{Air}	Mittlere spezifische Wärmespeicherkapazität der Raumluft	$\frac{J}{kgK}$
C_{Zone}	Wärmespeicherkapazität aller thermischen Speichermassen einer Zone	$\frac{J}{K}$
$DH_{\theta_{Max}}$	Summe aus dem Produkt von Stundenanzahl und Überschreitungsbeitrag der Lufttemperatur oberhalb einer Grenztemperatur θ_{Max}	Kh
$DT_{ISO15251}$	Relative Unter- bzw. Überschreitungszeit der vereinfachten Komfortkriterien nach ISO 15251 für Gebäudekategorie I (relative Luftfeuchte 30 bis 50 %, Raumlufttemperatur 20 bis 26°C)	%
E_A	Beleuchtungsstärke im Außenraum	Lux
E_V	Beleuchtungsstärke im Innenraum	Lux
f_{clo}	Anteil der bekleideten an der gesamten Körperoberfläche	[–]

f_{Fra}	Durch Rahmen, Stock und Sprossen eingenommener Anteil der Brutto- Fensterfläche eines Raumes	[-]
f_{Sha}	Durch das Verschattungssystem verdeckter Anteil der Brutto- Fensterfläche eines Raumes	[-]
g_{Gla}	Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung, d.h. Anteil der über transparente Flächen über Transmission und langwellige Abstrahlung in den Raum gelangenden Solarstrahlung	[-]
h_{Conv}	Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient einer Oberfläche	$\frac{W}{m^2K}$
h_{Rad}	Radiativer Wärmeübergangskoeffizient einer Oberfläche	$\frac{W}{m^2K}$
H_{Tra}	Transmissions- Verlustkoeffizient eines Raumes	$\frac{W}{K}$
H_{Ven}	Lüftungs- Verlustkoeffizient eines Raumes	$\frac{W}{K}$
I_{clo}	Mittlerer Wärmedurchlasswiderstand der Bekleidung	$\frac{W}{m^2K}$
KS	Kombinierter Wärmeübertragungskennwerte zwischen Körperkern und Körperhülle	$\frac{W}{K}$
L_{Body}	Ergebnis der stationären Wärmebilanz des menschlichen Körpers (Fanger)	W
L_{Core}	Ergebnis der instationären Wärmebilanz des menschlichen Körperkerns	W
L_{Skin}	Ergebnis der stationären Wärmebilanz der menschlichen Körperhülle	W
m_{Core}	Masse des Körperkerns	kg
m_{Skin}	Masse der Körperhülle	kg
m_{Sweat}	Schweißsekretionsrate	$\frac{g_{water}}{h}$
n_{Ven}	Luftwechselzahl, d.h. Anzahl der, innerhalb eines Zeitintervalls, durch Außenluft ausgetauschten Luftvolumeneinheiten einer Zone	\bar{h}
$OH_{\theta_{Max}}$	Anzahl der Stundenwerte der Lufttemperatur oberhalb einer Grenztemperatur θ_{Max}	h
$OT_{\theta_{Max}}$	Prozentualer Anteil der Stundenwerte der Lufttemperatur oberhalb einer Grenztemperatur θ_{Max}	h
P_{Sat}	Wasserdampf-sättigungsdruck der Luft	Pa
P_{Par}	Wasserdampfpartialdruck der Luft	Pa
PPD	Vorhergesagter Anteil derer die das Raumklima als unbehaglich empfinden	[-]

PMV	Vorhergesagtes mittleres thermisches Bewertungsmaß nach Fanger	$[-]$
Q_{Conv}	Wärmestrom von der (Haut-) Oberfläche an die Umgebung über Konvektion	W
Q_{Diff}	Wärmestrom von der (Haut-) Oberfläche an die Raumluft über Wasserdampfemission	W
Q_{Ex}	Summe des über Blutfluss und Wärmeleitung vom Körperkern zur Körperhülle übertragenen Wärmestroms	W
$Q_{Ex,Blood}$	Wärmeübertragungsfaktor aus Blutfluss zwischen Körperkern- und Körperhülle	$\frac{W}{K}$
$Q_{Ex,Cond}$	Wärmeübertragungsfaktor aus Wärmeleitung zwischen Körperkern- und Körperhülle	$\frac{W}{K}$
Q_H	Über Oxidationsprozesse im Körperinneren erzeugte Gesamtenergie	W
Q_{Met}	Über Oxidationsprozesse im Körperinneren erzeugter metabolischer Wärmestrom	W
Q_{NZ}	Transmissions- Wärmestrom von der betreffenden Zone zu einer Nachbarzone	W
Q_{Rad}	Wärmestrom von einer (Haut-) Oberfläche an die Umgebung über Strahlungsaustausch	W
$Q_{Res,L}$	Wärmestrom aus der Lunge an die Umgebung über Wasserdampfemission	W
$Q_{Res,S}$	Wärmestrom aus der Lunge an die Umgebung über Erwärmung der Atemluft	W
Q_{Sol}	Solarstrahlungs- Wärmestrom (kurzwellig) durch ein transparentes Bauteil	W
$Q_{Sol,op}$	Solarstrahlungs- Wärmestrom (kurzwellig) durch ein nicht- transparentes Bauteil	W
Q_{Sweat}	Wärmestrom von der Hautoberfläche an die Raumluft über Schweißemission	W
Q_{Tra}	Wärmestrom zwischen Raumluft und Bauteiloberfläche aus dem kombinierten Wärmeübergang (Strahlung, Konvektion, (Leitung))	W
Q_{Ven}	Wärmestrom zwischen Raumluft und Außenluft über Luftmassenaustausch	W

Q_W	In Kraft umgewandelte Energie der im Körperinneren erzeugten Gesamtenergie	W
T_{SV}	Vorhergesagte mittleres thermisches Bewertungsmaß nach Azer & Hsu	$[-]$
v_{Air}	Relative Luftgeschwindigkeit an einer Oberfläche	$\frac{m}{sec}$
\dot{V}_{Blood}	Blutaustauschmassenstrom je Kontaktflächeneinheit zwischen Körperkern und Körperhülle	$\frac{kg_{Blood}}{m^2h}$
\dot{V}_{Resp}	Luftaustauschmassenstrom der Lunge	$\frac{kg_{air}}{h}$
\dot{V}_{Ven}	Luftvolumenstrom zwischen einer Zone und der Außenluft	$\frac{m^3_{air}}{h}$
λ_{Skin}	Wasserdampfdurchlässigkeit der Hautschicht	$\frac{g_{water}}{hPa}$
ΔQ_{vap}	Verdampfungswärme von Wasser	$\frac{J}{g_{water}}$
ϵ_{Body}	Mittlerer Emissionsgrad des bekleideten menschlichen Körpers für langwellige Strahlung	$[-]$
ϵ_{Sweat}	Schweißbenetzungsfaktor der Hautoberfläche als Kennwert Überhitzungsempfindung	$[-]$
ϵ_{Vasoc}	Gefäßverengungsfaktor der Hautoberfläche als Kennwert Unterkühlungsempfindung	$[-]$
η_{Gain}	Anteil der zur Reduktion des Heizwärmebedarfs verwendbaren Nutzungs- und Solarstrahlungs- Wärmegewinne eines Raumes	$[-]$
η_{Heat}	Anteil der als Wärme freigesetzten Energie von der metabolischen Gesamtenergie	$[-]$
η_{Work}	Anteil der in Kraft umgewandelten Energie von der metabolischen Gesamtenergie	$[-]$
γ_{Zone}	Verhältnis zwischen den Wärmegewinnen (Solarstrahlung, Nutzung) und Wärmeverlusten (Transmission, Luftwechsel) einer Zone	$[-]$
$\gamma_{\alpha,\beta}$	Sonneneinfallswinkel einer Fläche mit Standwinkel β und Flächenazimuth α	$^\circ$
$\phi_{E,air}$	Relative Luftfeuchtigkeit der Außenluft	$\%$
$\phi_{I,air}$	Relative Luftfeuchtigkeit der Raumluft, Indizes: avg (Mittelwert), min (Minimum) und max (Maximum)	$\%$
θ_{Body}	Mittlere Temperatur des menschlichen Körpers	$^\circ C$

$\theta_{E,air}$	Außenlufttemperatur	$^{\circ}C$
θ_{ET}	Effektivtemperatur nach Gagge und Stollwijk	$^{\circ}C$
θ_{Clo}	Mittlere Oberflächentemperatur der Bekleidung eines menschlichen Körpers	$^{\circ}C$
θ_{Core}	Mittlere Kerntemperatur des menschlichen Körpers	$^{\circ}C$
$\theta_{I,air}$	Temperatur der Raumluft, Indizes: avg (Mittelwert), min (Minimum) und max (Maximum)	$^{\circ}C$
$\theta_{I,rad}$	Mittlere Strahlungstemperatur im Innenraum	$^{\circ}C$
θ_{Opt}	Neutral- bzw. Optimaltemperatur einer Umgebung	$^{\circ}C$
θ_{RM}	Gleitendes Mittel der Außenlufttemperatur	$^{\circ}C$
θ_{Skin}	Mittlere Temperatur der Hautschicht des menschlichen Körpers	$^{\circ}C$
θ_{SET}	Standardeffektivtemperatur nach Gagge und Stollwijk	$^{\circ}C$
θ_{wRM}	Gewichtetes gleitendes Mittel der Außenlufttemperatur	$^{\circ}C$
σ_{StBo}	Stefan- Boltzmann- Konstante	$\frac{W}{m^2K^4}$

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung, Ziel und Aufbau der Arbeit	19
1.1. Einleitung	19
1.2. Zielstellung und Lösungsansatz	22
1.3. Gliederung der Arbeit	24
2. Baulich- funktionelle und bauklimatische Besonderheiten von Kranken- hausbauten	27
2.1. Besonderheiten von Krankenhausbauten	28
2.2. Funktionelle Anforderungen	29
2.2.1. Räumlich- funktionelle Anforderungen an den Pflegebereich .	30
2.2.2. Hygienische Anforderungen an den Pflegebereich	32
2.2.3. Beleuchtungsanforderungen an den Pflegebereich	32
2.2.4. Brandschutzanforderungen an den Pflegebereich	33
2.2.5. Schallschutzanforderungen an den Pflegebereich	34
2.2.6. Anforderungen an die Barrierefreiheit	34
2.2.7. Gestalterische Anforderungen an den Pflegebereich	35
2.2.8. Belichtungsanforderungen an den Pflegebereich	36
2.2.9. Anforderungen an die Beheizung und Raumlufttechnik	37
2.2.10. Anforderungen an das Raumklima im Pflegebereich	38
2.3. Zusammenfassung der planerischen Anforderungen an das Patienten- zimmer	40
2.4. Gegenwärtige architektonische Gestaltung der Patientenzimmer	43
3. Verfahren zur Bemessung des Sommerlichen Wärmeschutzes	47
3.1. Verfahrensüberblick	48
3.2. Handrechenverfahren	49
3.2.1. Verfahren nach Petzold	50
3.2.2. Verfahren nach Rouvel und Kolmetz	52

Inhaltsverzeichnis

3.2.3.	Verfahren nach Hauser und Otto	53
3.2.4.	Verfahren nach Hauser & Gertis	55
3.2.5.	Verfahren nach Häupl	56
3.2.6.	Verfahrensübersicht	58
3.3.	Simulationsverfahren	59
3.3.1.	Simulationssoftware Energy Plus für die Sommerfallbewertung	59
3.3.2.	Anwendung von Simulationsrechnungen für die Sommerfallbe- wertung	61
4.	Kritische Bewertung der Handrechenverfahren und des Simulationsver- fahrens	63
4.1.	Untersuchte Zonen des Universitätsklinikums Dresden	64
4.2.	Ergebnisse der Messreihe Juli bis Dezember 2010	65
4.3.	Bewertung der Zonen mittels vereinfachter Verfahren	68
4.3.1.	Vergleich der Verfahrensergebnisse mit den Messungen	72
4.3.2.	Verfahrenseinschätzung Hauser & Gertis	75
4.3.3.	Verfahrenseinschätzung Petzold	75
4.3.4.	Verfahrenseinschätzung Häupl	76
4.3.5.	Verfahrenseinschätzung Hauser & Otto	77
4.4.	Bewertung der Zonen mittels Simulationsverfahren	79
4.4.1.	Modellauswahl	79
4.4.2.	Nutzungsrandbedingungen	80
4.4.3.	Klimarandbedingungen	80
4.4.4.	Ergebnisse	80
4.5.	Zusammenfassung Verfahrensbewertung	84
5.	Entwicklung eines eigenen Kalibrierverfahrens	85
5.1.	Untersuchte Zonentypen der zweiten Messphase 2011	86
5.2.	Ergebnisse der Messreihe Juli - Dezember 2011	88
5.3.	Simulation einer Basisvariante	90
5.4.	Ermittlung der lokalen Außenklimabedingungen	93
5.5.	Ermittlung der Nutzungscharakteristik	95
5.5.1.	Aktivierung & Deaktivierung des Sonnenschutzes	95
5.5.2.	Fensteröffnung	99
5.5.3.	Interne Wärmelasten	103
5.6.	Bekannte Kalibrierverfahren	105

5.7.	Eigener Kalibrieransatz zur Ermittlung von Nutzungsprofilen	107
5.8.	Verfahrensprozedur	111
5.8.1.	Aufstellung der Varianten für die unbekannt Profile	115
5.8.2.	Sensitivitätsstudie Nutzungsprofile	120
5.8.3.	Simulationsstudien zur Ermittlung der realistischsten Nutzer- profile	122
5.8.4.	Ergebnis	126
5.9.	Zusammenfassung	129
6.	Nutzeranforderungen und Bewertungsmodelle	131
6.1.	Anforderungen und Besonderheiten der Krankenhausnutzer allgemein	132
6.2.	Anforderungen und Besonderheiten spezieller Nutzergruppen	135
6.2.1.	Neugeborene, Säuglinge und Kleinkinder	135
6.2.2.	Senioren	136
6.2.3.	Personen unter Medikamenteneinfluss	138
6.2.4.	Personen mit Krankheiten und Behinderungen	138
6.2.5.	Zusammenfassung der thermoregulatorischen Besonderheiten unterschiedlicher Nutzertypen	140
6.2.6.	Ergebnisse praktischer Studien zum Raumklimaoptimum	143
6.2.7.	Ergebnisse praktischer Studien zum erträglichen Raumklima	145
6.2.8.	Zusammenfassung der Besonderheiten spezieller Nutzertypen	146
6.3.	Nutzerbezogene Bewertungsmodelle	148
6.3.1.	Auswertungsansatz	148
6.3.2.	Physiologische Wärmebilanz	150
6.3.3.	Statisches, stationäres PMV- Modell nach Fanger	154
6.3.4.	Statisches, instationäres Modell nach Gagge & Stollwijk	157
6.3.5.	Statisches, instationäres TSV - Modell nach Azer & Hsu	160
6.3.6.	Adaptive Modelle	163
6.3.7.	Bewertung der Behaglichkeitsmodelle	167
6.3.8.	Schlussfolgerungen zur Raumklimaauslegung in Krankenhäusern	178
7.	Analyse der Raumtypen und Ableitung von baulichen Optimierungsansät- zen	181
7.1.	Analyseansatz	182
7.1.1.	Auswahl der Berechnungsmodule	182
7.1.2.	Auswahl der Außenklimabedingungen	184

Inhaltsverzeichnis

7.1.3. Definition der Nutzungseigenschaften	184
7.1.4. Definition der Raumgeometrie und Konstruktionseigenschaften	185
7.2. Wärmebilanzen der einzelnen Raumtypen	187
7.3. Speicherwirksamkeit der Bauteile	188
7.4. Strahlungsdurchgang durch die Verglasung	190
7.5. Luftwechsel aus natürlicher Belüftung und mechanischer Entlüftung .	191
7.6. Tageslichtversorgung	192
7.7. Raumklimabewertung	194
7.8. Optimierungsansätze	196
8. Zusammenfassung und Ausblick	197
Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	XI
Literaturverzeichnis	XV
A. Anhang	XXIII
A.1. Beschreibung der Außenklimamessstation Dresden- Johannstadt . . .	XXIII
A.2. Auswertung Stadtklimamessungen der DREWAG	XXV
A.3. Raumübersicht (Kennwerte) und Verfahrensvergleich der Messphase I (2010)	XXX
A.4. Übersichten Gebäudesimulation, Behaglichkeitsmodelle	XXXIV
A.5. Raumübersicht (Kennwerte) der Messphase II (2011)	XXXVI
A.6. Kalibrierverfahren nach Reddy und Sun	XXXVII

1. Einleitung, Ziel und Aufbau der Arbeit

1.1. Einleitung

In Anbetracht der globalen klimatischen Veränderung kommt dem sommerlichen Lastfall eine stetig wachsende Bedeutung zu. Das Problem besteht dabei nicht allein im Anstieg der Jahresmitteltemperaturen. Die großmaßstäblichen Veränderungen sind vielschichtig und stellen sich für die einzelnen Regionen sehr unterschiedlich dar. Auch Sachsen folgt dem allgemeinen Trend ansteigender Außenlufttemperaturen. Für die Periode von 1990 bis 2005 erhöhte sich die Jahresmitteltemperatur im Freistaat um ca. 0,9 K. Dieser Temperaturanstieg ist einerseits auf die milderen Winter zurückzuführen und geht andererseits mit einer Veränderung der sommerlichen Witterungsverhältnisse einher. Der Vergleich zwischen den Langzeitmessungen der Perioden 1961-1990 und 1991-2005 in Sachsen zeigt, mit Ausnahme der Mittelgebirgsregionen, eine konstante Zunahme des Temperaturniveaus. Das äußert sich unter anderem in einer Zunahme der Sommertage (Tage mit Temperaturen über 20°C) und der heißen Tage (Tage mit Temperaturen über 30°C). [Bernhofer u. Goldberg, 2008] [Küchler u. Sommer, 2005].

Es ist daher abzusehen, dass die physiologische Wärmebelastung in den sächsischen Regionen außerhalb der Mittelgebirge zunimmt. Stadtregionen sind darunter die am stärksten betroffenen Gebiete. Deren Jahresmitteltemperatur liegt auf Grund der zusätzlichen anthropogenen Wärmequellen, des höheren Versiegelungs- und Bebauungsgrades und der schlechteren Durchlüftung höher als die des Umfeldes. Diese Entwicklung wirkt sich in baulicher Hinsicht vor allem auf die in Gebäuden vorherrschenden sommerlichen Raumlufttemperaturen, d.h. den Sommerlichen Wärmeschutz, sowie die damit in Zusammenhang stehende Wärmebelastung aus.

1. Einleitung, Ziel und Aufbau der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit soll der Sommerliche Wärmeschutz für Krankenhäuser, ein Gebäudetyp mit hohen Anforderungen an das Raumklima, betrachtet werden. Deren Standorte sind aus infrastrukturellen Gründen häufig innerstädtisch gelegen. So ist von 25 000 sächsischen Krankenhausbetten (79 Krankenhäuser) etwa die Hälfte der Kapazität in den Ballungsgebieten Dresden, Leipzig und Chemnitz zu finden. Darunter befinden sich insbesondere die Kliniken der höheren Versorgungsstufen, beispielsweise die beiden sächsischen Krankenhäuser mit Maximalversorgung, das Universitätsklinikum Leipzig und das Universitätsklinikum Carl Gustav Carus Dresden. [KHG Sachsen, 2009]

Ein Indiz für die sensiblen Anforderungen derartiger Bauten ist im hohen Anteil der hitzebedingten Todesfälle in Krankenhäusern nach längeren Schönwetterphasen zu sehen. Diese Art der Todesfälle führt die Statistik der weltweit verzeichneten witterungsbedingten Todesfälle an ([McMichael u. a., 2004]). Neben der erhöhten Sterblichkeit unterschiedlicher Altersgruppen in Folge von Dehydratation kommt es insbesondere in der Gruppe der Älteren, über 65- Jährigen, zu einem überproportionalen Anstieg der Todesfälle, welcher auf die indirekten Folgen der Wärmebelastung zurückzuführen ist. Dieser wird als Harvestingeffekt bezeichnet [Basu u. Samet, 2002]. Verschiedene Studien kamen zu der Erkenntnis, dass diese hitzebedingte Mehrsterblichkeit für die besagte Personengruppe etwa 10 bis 24 % beträgt. [Koppe, 2005].

Die Hauptursache dieses Harvestingeffekts in Krankenhäusern ist sicherlich darin zu sehen, dass das Krankenhaus als Akkumulationsort körperlich geschwächter Personen diese außerklimatischen Belastungssituationen in einem verstärkten Maß reflektiert. Folglich muss bei der Planung dieser Bauten ein besonderes Augenmerk auf die Bereitstellung stabiler und erholsamer Raumklimabedingungen gelegt werden. Die Umsetzung dieser Anforderung kann, angesichts der ansteigenden Energiepreise, jedoch nicht in einem flächendeckenden Einsatz von Klimaanlage bestehen. Es müssen in erster Linie geeignete Methoden zur Optimierung des passiven, d.h. baulichen, Sommerlichen Wärmeschutzes gefunden werden.

Unter den zur Verfügung stehenden Methoden gibt es grundsätzlich zwei Typen von Bewertungsverfahren, die Vorbemessungsverfahren und die detaillierten Bemessungsverfahren. Erstere zielen darauf ab, mit einem möglichst geringen Eingabe- und Rechenaufwand eine Einschätzung des baulichen sommerlichen Wärmeschutzes vorzunehmen. Die praktischen Erfahrungen mit der Anwendung dieser Verfahren legen

jedoch nahe, dass diese nicht zuverlässig sind. Demgegenüber erfordern die detaillierten Verfahren einen größeren Eingabe- und Rechenaufwand, können jedoch, sofern die Eingabedaten wirklichkeitsgetreu sind, realistischere Ergebnisse erzielen.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem detaillierteren Verfahren (Gebäudesimulationsverfahren). Da dieses Verfahren auf anerkannten physikalischen Ansätzen beruht und einen großen Detaillierungsgrad in der Berücksichtigung der Bauwerkseigenschaften, der Bauwerks Umgebung, der Nutzungsbedingungen uvm. verfügt, sind dessen Potenziale beachtlich. Es bietet neben einer wissenschaftlich abgesicherten Lösung auch die Möglichkeiten zur Mehrfachverwendung des Gebäudemodells für andere Fachplaner (z.B. Technische Gebäudeausstattung, Wirtschaftlichkeitsberechnung), zur Einbindung von Schnittstellen zu anderen Softwareanwendungen, zur Bewertung neuer Technologien uvm. Es kann damit maßgeblich zu einem verlässlichen, innovativen sowie kosten- und zeitoptimierten Planungsprozess beitragen.

Gegenwärtig kann das Potenzial dieser Gebäudesimulationsverfahren in der Praxis jedoch nicht ausgeschöpft werden. Das ist grundsätzlich auf zwei Ursachengruppen zurückzuführen (siehe Abb. 1.1¹). Erstens fehlt es an Anwendungsvoraussetzungen für die frühen Planungsphasen. Dazu zählen beispielsweise die Möglichkeit zur Gegenüberstellung von Varianten oder Anleitungen zum Umgang mit unsicheren Eingabekennwerten. Zweitens sind grundlegende Voraussetzungen für den Einsatz in der Praxis zu schaffen. Hierfür sind unter anderem Erkenntnisse und Richtlinien für die Auswahl der Eingabekennwerte, praktikable Auswertungsansätze, systematische Fehler- und Plausibilitätsprüfungen sowie praxistaugliche Dokumentationen der komplexen Ein- und Ausgabedaten erforderlich. Daneben gibt es Faktoren, welche für beide Anwendungsbereiche von Bedeutung sind, beispielsweise der zeitliche und monetäre Verfahrensaufwand (z.B. für die Einarbeitung, Dateneingabe, Berechnung und Auswertung) oder die Einbettung dieser Verfahren in den gesamten Planungsprozess (z.B. Wiederverwendbarkeit von Gebäudemodellen, Bereitstellung von Schnittstellen zwischen unterschiedlichen Softwareanwendungen).

Ein Teil dieser Voraussetzungen wurde bereits befördert. So haben die kommerziellen Softwarehersteller zu einer deutlichen Optimierung des Planungsprozesses beigetragen, beispielsweise mit der Einbindung universaler Austauschformate für Gebäudemodelle (z.B. Revit (Autodesk):gbxml, Allplan (Nemetschek):ifc) und der

¹Diese Darstellung wurde sinngemäß aus der Übersicht zur EnTool- Forschungsinitiative übernommen. [Quelle: J. Grunewald „EnTool Research Initiative: Ideas, Definitions and Aims“, Vortrag zum EnTool- Symposium vom 10. bis 14. Juli 2013 in Dresden]

1. Einleitung, Ziel und Aufbau der Arbeit

Bereitstellung hochwertiger grafischer Nutzeroberflächen zur Gebäudemodellerstellung und -bearbeitung. Wichtige Beiträge für die Vernetzung der Planungswerkzeuge unterschiedlicher Fachbereiche und zur Ermittlung realistischerer Eingabedaten lieferten zudem Forschungsinitiativen des Bundes wie EnOB², EnEff-Stadt und EnEff-Wärme³. Auch die Neufassung der HOAI⁴ ist als wichtiger Impuls zur Vernetzung zwischen Fachplanungsbereichen und Architektenleistung zu sehen, da die zu erbringenden Planungsgrundleistungen auf verschiedene Fachbereiche (z.B. Bauphysik, siehe Abs.1.2, A.1, HOAI 2013) ausgeweitet wurden.

1.2. Zielstellung und Lösungsansatz

Zwei wichtige Voraussetzungen für den Transfer der Simulationsverfahren in die Planungspraxis wurden bislang noch nicht zufrieden stellend geschaffen. Diese sind realistische Eingangsdaten und praktikable Auswertungsansätze (siehe Abb.1.1). So ist der große Detaillierungsgrad der Eingangsdaten auch gleichzeitig eine große Fehlerquelle, insofern nicht realistische Datensätze für das Außenklima, die Baustoff- und Baukonstruktionsdaten, die technischen Anlagen und insbesondere die Nutzungsbedingungen verfügbar sind. Ebenso ist in Anbetracht der Vielzahl von Auswertungsansätzen für die Simulationsergebnisse unklar, für welchen Einsatzzweck sie sich jeweils eignen.

Die vorliegende Arbeit bietet für diese beiden Aspekte Lösungsansätze. Sie soll damit die Anwendung der Gebäudesimulation in der Planungspraxis erleichtern und letztlich eine Verbesserung des Planungsprozesses fördern.

Die Betrachtungen werden am Beispiel von Krankenhausbauten des Universitätsklinikums Dresden (UKD) vorgenommen. Dieser Bauwerkstyp weist in Bezug auf den Sommerfall besonders ungünstige Voraussetzungen auf und ist daher ein anspruchsvoller Anwendungsfall. Die relevanten Planungsnormen fordern große Fens-

²EnOB („Forschung für Energieoptimiertes Bauen“) ist ein seit ca. 2006 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördertes Programm. Es befasst sich mit der energetischen Optimierung der gesamten Wertschöpfungskette eines Bauwerks. Website: www.enob.info

³EnEff-Stadt („Forschung für die energieeffiziente Stadt“) und EnEff-Wärme („Forschung für energieeffiziente Wärme- und Kältenetze“) sind ebenfalls Programme des BMWi und stellen eine Ergänzung des Einzelbauwerkansatzes in EnOB um den energetischen Verbund von Siedlungen und kommunale Versorgungsnetze dar. Website: www.enneff-stadt.info

⁴Die Neufassung der HOAI („Honorarordnung für Architekten und Ingenieure“) wurde im Juni 2013 vom Bundesrat beschlossen. Website: <http://www.bundesrat.de/bv.html?id=0334-13>

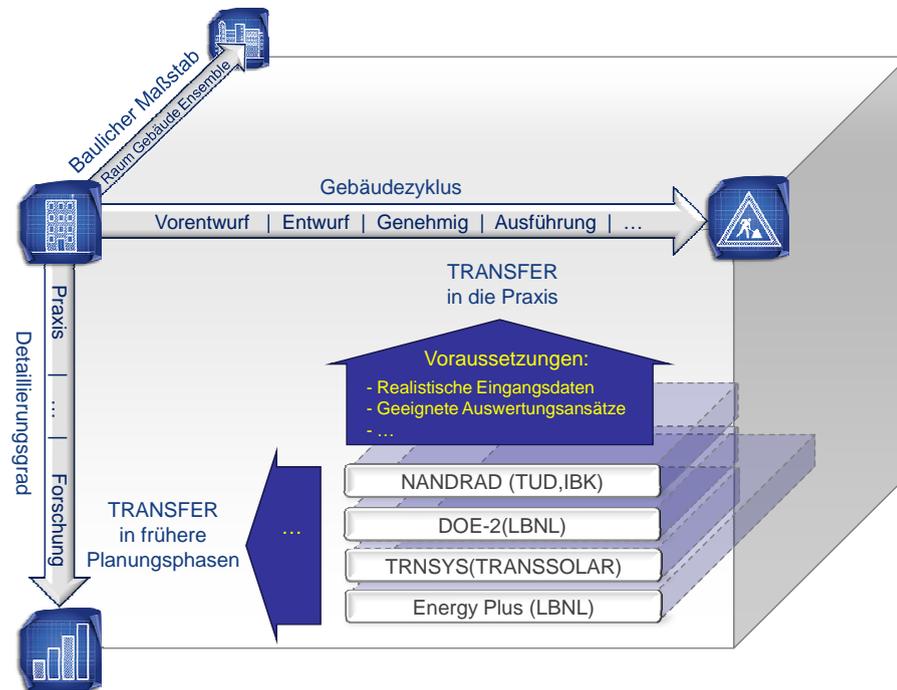


Abbildung 1.1.: Einordnung ausgewählter Gebäudesimulationsverfahren im Kontext der Planungs- und Maßstabebenen eines Bauwerks sowie Darstellung der angestrebten Transferrichtungen und der in dieser Arbeit behandelten, erforderlichen Voraussetzungen für den Praxistransfer.

terflächen zur Gewährleistung des Ausblicks und einer ausreichenden Tageslichtversorgung. Dem gegenüber stehen hohe Belegungsdichten, kompakte Raumvolumen und geringe thermische Speichermassen, welche sich aus Optimierungsüberlegungen zur Grundrissvariabilität, der Baukosteneinsparung und der Bauablaufplanung ergeben. Ein weiterer Faktor ist in den Nutzereigenschaften zu sehen. In Gebäuden mit raumweise bedienbarem Sonnenschutz und freier Fensterlüftung werden aktive Bauwerksnutzer vorausgesetzt, welche diese Gegebenheiten möglichst optimal einsetzen. Bettlägerige Patienten sind hingegen auf die Zuarbeit des Krankenhauspersonals angewiesen, welches für derartige Hilfsarbeiten nur sporadisch zur Verfügung steht. Zudem muss davon ausgegangen werden, dass diese Patienten wegen ihres schlechten Gesundheitszustandes eine geringere Toleranz gegenüber Raumklimaschwankungen besitzen.

1.3. Gliederung der Arbeit

Der erste Abschnitt der Arbeit (Kapitel 2 bis 4) befasst sich mit dem gegenwärtigen Planungsprozess für Pflegestationen und Krankenzimmer. In Kapitel 2 werden die wesentlichen Planungsanforderungen erläutert und es wird deren Umsetzung an Hand einer Projektauswahl dargestellt und bewertet. Kapitel 3 befasst sich darauf aufbauend mit einer Auswahl von Bemessungsmethoden für den Sommerlichen Wärmeschutz. Diese Methoden werden in Kapitel 4 mit Hilfe von Messungen bewertet. Zu diesem Zweck wurden auf dem Gelände des Universitätsklinikums Dresden in drei unterschiedlichen Gebäuden jüngeren Baujahres (ca. 1995 bis 2003) in etwa dreißig verschiedenen Räumen über einen Zeitraum von zwei Sommerperioden (2010, 2011) Raumklimamessungen durchgeführt. Als Ergebnis dieses Abschnittes werden Schlussfolgerungen zur Aussagefähigkeit der bestehenden Bemessungsverfahren gegeben und daraus Anwendungshinweise abgeleitet.

Im zweiten Abschnitt (Kapitel 5 und 6) wird eine Methode zur Verbesserung des Verfahrens mit der höchsten Aussagefähigkeit, der thermischen Gebäudesimulation, entwickelt. Die Kernprobleme bei der Anwendung von Simulationsrechnungen sind mangelnde Kenntnisse über das reale Nutzerverhalten sowie ungenügende Ansätze zur Auswertung der Ergebnisse. Zur Lösung des ersten Aspektes wird in Kapitel 5 ein Kalibrierverfahren entwickelt und angewandt, welches die experimentelle Ermittlung des Nutzerverhaltens basierend auf Stichproben und Raumklimamessungen ermöglicht. Hierfür wurden weitere Raumklimamessungen in einem ausgewählten Gebäude des UKD (Haus 21) durchgeführt, sowie zeitgleich lokale Außenklimadaten über eine eigens errichtete meteorologische Station auf dem Gelände des UKD (Blasewitzer Straße) erfasst.

Zur Lösung des zweiten Punktes wird in Kapitel 6 geklärt, welches Bewertungsmodell der Raumklimaempfindung für die betrachtete Nutzergruppe anwendbar ist. Derzeit werden grundsätzlich zwei Verfahrensgruppen unterschieden, die statischen⁵ und die adaptiven⁶ Verfahren. Beide Verfahren werden, basierend auf einer detaillierten Analyse der physiologischen Besonderheiten von Patienten, bewertet. Ergänzend werden Ergebnisse praktischer Komfortbefragungen in Krankenhausbauten hinzugezogen.

⁵ Als statische Verfahren werden Methoden zur Beurteilung des Raumklimas bezeichnet, welche ein vorhersehbares, statisches Verhalten des Nutzers voraussetzen.

⁶ Adaptive Verfahren berücksichtigen ein Anpassungsverhalten des Nutzers bei instationären Raumklimaverhältnissen.

1.3. Gliederung der Arbeit

Im letzten Abschnitt (Kapitel 7) der Arbeit wird das kalibrierte Simulationsmodell auf drei typischen Grundrissformationen von Patientenzimmern angewandt. Es erfolgt eine detaillierte bauklimatische Bewertung unter der Berücksichtigung bestehender Planungsanforderungen. Aus dieser Bewertung werden Ansätze zur Optimierung des Sommerlichen Wärmeschutzes für Patientenzimmer abgeleitet.

2. Baulich- funktionelle und bauklimatische Besonderheiten von Krankenhausbauten

In diesem Abschnitt werden die Besonderheiten des gewählten Gebäudetyps erläutert. Es wird an Hand des Pflegebereichs und der darin untergebrachten Patientenzimmer dargestellt, welche Anforderungen an einen Krankenhausbau aus planerischer Sicht bestehen. Diese Anforderungen stellen einen Kompromiss zwischen den Tendenzen des deutschen Gesundheitssystems, z.B. Kostenoptimierung, und den Bedürfnissen des Patienten selbst, z.B. erholsames Umfeld, dar. Vor diesem Hintergrund muss der Planer die Anforderungen an Wirtschaftlichkeit, Funktionalität, Nutzungsvariabilität, Barrierefreiheit, Schallschutz, Brandschutz, Belichtung und Beleuchtung sowie an zahlreiche weitere Fachbereiche vereinigen.

2.1. Besonderheiten von Krankenhausbauten

Krankenhausbauten unterliegen in besonderer Weise einem zeitlichen Wandel. Der ursprünglich unter staatlicher Obhut stehende Gebäudetypus wurde in den vergangenen Jahren zunehmend in privater Trägerschaft geführt. Von ca. 2100 deutschen Kliniken im Jahr 2010 befanden sich etwa ein Drittel (32,9 %) in privater Hand. 1991 lag dieser Anteil bei lediglich 15 %¹. Diese Privatisierungstendenz ist auch an den öffentlichen Krankenhäusern erkennbar. Hier wurden im Jahr 2010 etwa 58 % in privatrechtlicher² Form betrieben ([StaBA 2011, 2011a]). Die zunehmende Privatisierung geht in erster Linie mit einer wirtschaftlichen Optimierung durch Kosteneinsparungen einher.

Diese Optimierungsüberlegungen sind insbesondere in Hinblick auf die sich ändernde Altersstruktur der Deutschen erforderlich. Waren im Jahr 1990 noch 20,4 % der Deutschen über 60 Jahre alt, so waren es 2010 bereits 26 %. Die gestiegene Lebenserwartung und die zunehmenden medizinischen Möglichkeiten führen perspektivisch zu einer zeitlich und finanziell aufwendigeren medizinischen Versorgung. Diese Tendenz wird durch die steigenden Patientenzahlen³ und die steigenden Kosten pro Behandlungsfall⁴ bestätigt. [StaBA 2011, 2011a]

Die Krankenhausbetreiber versuchen dieser Kostensteigerung mit unterschiedlichen Mitteln entgegen zu wirken. Zu diesen Mitteln ist unter anderem die Zentralisierung der medizinischen Versorgung⁵ zu zählen. Des Weiteren wurde die Verweildauer⁶ der Patienten sukzessive reduziert. Der Grund für diese Entwicklung ist darin zu sehen, dass die Krankenkassen je nach Einordnung des Krankheitsfalls und nicht

¹Die Privatisierungstendenz betrifft vorwiegend kleine Krankenhäuser. Bezogen auf die Bettanzahl ist diese Tendenz daher nicht so stark ausgeprägt. Von der gesamten bundesdeutschen Bettenkapazität waren 2010 lediglich 17 % in privater Hand.

²Krankenhäuser können als öffentliche, frei-gemeinnützige oder private Einrichtungen geführt werden. Private Krankenhäuser sind rechtlich und wirtschaftlich eigenständig. Öffentliche Krankenhäuser können in öffentlich-rechtlicher oder in privatrechtlicher Form betrieben werden. Im ersten Fall sind sie entweder rechtlich selbständige (z.B. Stiftung, Zweckverband) oder rechtlich unselbständige Betriebe (z.B. Regie- oder Eigenbetrieb). Im zweiten Fall (z.B. GmbH) unterliegen sie wie die privaten Einrichtungen einer wirtschaftlichen Selbständigkeit.

³Im Jahr 1991 wurden deutschlandweit ca. 14 Mio Behandlungsfälle verzeichnet. Im Jahr 2010 waren es 18 Mio. [StaBA 2011, 2011a]

⁴Die Kosten pro Behandlungsfall stiegen von ca. 2500 Euro im Jahr 1991 auf ca. 3800 Euro im Jahr 2010. [StaBA 2011, 2011b]

⁵Die Anzahl der Krankenhausbauten reduzierte sich von etwa 2400 im Jahr 1991 auf ca. 2100 im Jahr 2010. [StaBA 2011, 2011a]

⁶Die Verweildauer sank von 14 Tagen im Jahr 1991 auf 7,9 Tage im Jahr 2010. [StaBA 2011, 2011a]

nach individuellem Gesundheitszustand des Patienten eine pauschale Verweildauer vergüten. Aus diesem Grund werden die Patienten bei gleichem Krankheitsbild heute früher entlassen als noch vor 20 Jahren. Im Volksmund wird dieser Umstand mit dem Begriff „blutige Entlassung“ charakterisiert. Diese Maßnahme verursacht allerdings eine höhere Fluktuation und folglich eine verschlechterte Bettenauslastung. [StaBA 2011, 2011a]

Aus planerischer Sicht ergeben sich aus diesen Tendenzen schärfere Anforderungen an Krankenhausbauten.

Einerseits spielen wirtschaftliche Erwägungen eine zunehmende Rolle. So müssen die Raumprogramme stärker auf einen optimalen Klinikbetrieb ausgelegt werden. Die räumlichen Organisationsstrukturen sind primär auf die Kern- und Supportprozesse auszurichten. Das erfordert effektive Planungsmethoden und aus baulicher Sicht eine kompaktere räumliche Anordnungen der Funktionsbereiche. Weitere bauliche Anforderungen ergeben sich aus dem Ziel einer Sachkostenreduktion. So können beispielsweise die Gebäudehülle und die technische Gebäudeausstattung auf geringe Betriebs- und Instandhaltungskosten ausgelegt werden.

Andererseits sind die im Krankenhaus untergebrachten Patienten auf Grund ihres verkürzten Aufenthaltes in einem schlechteren Gesundheitszustand. Der kürzeren Verweildauer steht der verkürzte Betreuungsaufwand des Personals gegenüber. Aus baulicher Sicht ist es daher um so wichtiger, dem Patienten eine erholsame und heilsame Umgebung bereit zu stellen. Das Patientenzimmer stellt den Hauptaufenthaltort der Patienten dar und sollte aus diesem Grund einen Schwerpunkt der Entwurfsüberlegungen bilden.

2.2. Funktionelle Anforderungen

Der Entwurf eines Pflegebereiches muss eine Vielzahl von funktionellen Anforderungen berücksichtigen. Dazu gehören die räumlichen Beziehungen der Nutzungsbereiche zueinander, konstruktive Anforderungen, hygienische Anforderungen, brandschutztechnische Anforderungen, Belichtungs- und Beleuchtungsanforderungen. Darüber hinaus sollte der Entwurf auch ästhetischen Ansprüchen gerecht werden und Faktoren wie Wiedererkennung, Akzeptanz, Orientierung und Übersichtlichkeit umsetzen. [Rauh, 2001], [Schmiege u. Maderer, 2001] [Schrickler, 2001]

2. *Baulich- funktionelle und bauklimatische Besonderheiten von Krankenhausbauten*

Für die Entwurfsausarbeitung bietet sich die Anwendung eines modularen Systems bzw. Entwurfsrasters an. Ein bevorzugtes Rastermaß ist 1,20 m. Sämtliche Bauwerkselemente und auch das statische System sollten auf dieses Raster ausgerichtet werden. Die im Krankenhaus umgesetzten Tragwerksraster stellen dementsprechend ein Vielfaches (z.B. 7,20 m) dieses Entwurfsrasters dar. Dadurch können die Ausführungsphase optimiert und der spätere Austausch von Modulen vereinfacht werden. [Neufert u. Neufert, 2012]

2.2.1. **Räumlich- funktionelle Anforderungen an den Pflegebereich**

Eine Übersicht der allgemeinen Funktionsbereiche im Krankenhaus enthält die DIN 13080. Pflegebereiche werden demnach in Allgemeine Pflegebereiche, Aufnahmepflegebereiche und Spezialisierte Pflegebereiche für Neugeborene, Säuglinge und Kinder, Wöchnerinnen, Schwerkranke (Intensiv- Pflegebereich), Dialysepatienten, Infizierte, psychisch Kranke und nuklearmedizinisch behandelte Personen unterteilt. [DIN 13080, 2003]

Der Pflegebereich ist dadurch charakterisiert, dass er ein in sich geschlossener Bereich ist. Er enthält die Bettenzimmer mit Sanitärtrakt sowie verschiedene Funktions- und Verkehrsbereiche.

Die Verkehrsbereiche sollten je nach Funktion auf die Passierbarkeit durch Rollstühle (min. 1,50 m Breite) oder Krankenbetten (min. 2,25 m) ausgerichtet sein. Sie bieten sich für die Unterbringung der Versorgungsleitungen an. Zu diesem Zweck können die abgehängten Decken bis auf eine Raumhöhe von 2,40 m abgesenkt werden. Aus Brandschutzgründen sind in diesem Fall besondere Deckenausführungen erforderlich. Zur Vermeidung mechanischer Rauchabführung ist es günstiger, die Korridore nicht als innen liegende Bereiche zu planen. [Neufert u. Neufert, 2012]

Funktionsbereiche können Aufenthaltsräume, Stationsküchen, Aufsichtsräume, Pausenräume, Umkleieräume und Sanitärtrakte des medizinischen Personals, Diensträume der Ärzte, Untersuchungs- und Behandlungsräume sowie kleineren Funktionsbereiche (reine und unreine Arbeitsräume, Geräte- und Vorratsräume, Entsorgungsraum, Putzmittelraum) darstellen. Auf jeder Station sollte zumindest ein Untersuchungs- und Behandlungsraum vorhanden sein in welchem kleinere Untersuchungen vorgenommen werden können. [Rauh, 2001], [Schmieg u. Maderer, 2001] [Neufert u. Neufert, 2012]

2.2. Funktionelle Anforderungen

Der Eingangsbereich sollte von der Schwesternstation aus einzusehen sein. Zudem ist ein direkter Zugang zum Wäsche- und Medikamentenraum erforderlich und eine zentrale Lage der übrigen Bereiche (Entsorgung, Putzmittel etc.) wünschenswert. [Neufert u. Neufert, 2012]

Das Patientenzimmer muss einerseits auf die Arbeitsabläufe des Personals und andererseits auf die Aufenthaltsanforderungen der Patienten ausgerichtet werden. Die Mindestgröße von 16 m^2 (Zweibettzimmer) sollte nicht unterschritten werden.

Die Arbeitsabläufe am Patientenbett erfordern eine Zugänglichkeit des Krankentettes von drei Seiten. Die Betten sollten so angeordnet sein, dass sie voneinander getrennt aus dem Zimmer gefahren werden können ohne dass dafür das jeweils andere Bett verrückt werden muss. Zu diesem Zweck ist auch eine Schutzleiste im Rangierbereich der Betten anzubringen. Am Bett sollte ausreichend Platz für die medizinische Apparaturen vorhanden sein. Außerdem sollte eine Versorgungsleiste mit Stromanschluss, Schwesternnotruf und je nach Station z.B. medizinischen Gasen (Sauerstoff) angebracht sein. [Neufert u. Neufert, 2012]

Für den Patienten sollte neben dem Bett ein Sitzbereich zum Lesen, zum Einnehmen der Mahlzeiten oder Empfang von Besuch vorhanden sein. Vom Bett aus sollte der Patient einen Tisch oder einen kleinen Nachtschrank erreichen können in welchem persönliche Dinge untergebracht und weggeschlossen werden können. Eine vom Zimmer aus zugängliche Sanitärzelle ist mittlerweile Standard. Diese sollte mindestens ein Waschbecken und WC, nach Möglichkeit auch eine Dusche, enthalten. [Neufert u. Neufert, 2012]

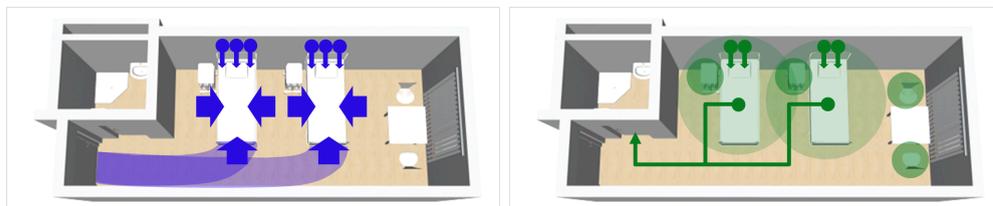


Abbildung 2.1.: Funktionelle Anforderungen Patientenzimmer. Links: Dreiseitiger Bettzugang für das Personal, medizinische Versorgungseinheit (Strom, Gase, Notruf u.a.) am Bett, separate Bewegung der Betten. Rechts: Eigener Bewegungsbereich für die Patienten, Nachttisch, Anbindung an Versorgungseinheit (Leuchte, Telefon u.a.), Sitzbereich, angegliederter Sanitärtrakt

2. *Baulich- funktionelle und bauklimatische Besonderheiten von Krankenhausbauten*

2.2.2. **Hygienische Anforderungen an den Pflegebereich**

Eine Zusammenfassung der hygienischen Anforderungen an Pflegeeinheiten enthält die Hygienerichtlinie des Robert Koch Instituts. In Bezug auf die bauliche Gestaltung der Pflegeeinheiten empfiehlt die Richtlinie eine Pflegeeinheitsgröße von maximal 40 Betten, eine in sich geschlossene Gestaltung der Pflegeeinheiten (z.B. kein Durchgangsverkehr). In organisatorischer Hinsicht ist eine Trennung unterschiedlicher Keimspektren im Pflegebereich sowie in den Untersuchungs- und Behandlungsräumen umzusetzen. Zudem sollten für mindestens zehn Prozent der Patienten Einzelzimmer (Infektionsprophylaxe) vorgesehen sein. Besondere hygienische Anforderungen sind auf Neugeborenen- und Kinderstationen sowie Stationen mit chronisch und psychisch Kranken zu beachten. [KhRl 2003, 2003]

Die Patientenzimmer sollten so gestaltet sein, dass höchstens vier Personen in einer Einheit untergebracht sind und der Mindestabstand von einem Meter zwischen den Betten eingehalten wird. Zur Gewährleistung der Individualhygiene ist die direkte Angliederung einer Sanitärzelle an das Patientenzimmer von Vorteil. Die Baustoffe der Patientenzimmer sind so auszuwählen, dass Wände, Fußböden und Einrichtungsgegenstände vollständig desinfiziert werden können. Das impliziert den Verzicht auf Textilbeläge und erfordert geschlossene Leitungsverlegung sowie Abdichtung von Hohlräumen und Installationsdurchführungen. [KhRl 2003, 2003]

2.2.3. **Beleuchtungsanforderungen an den Pflegebereich**

Empfehlungen für die Auslegung der Beleuchtung sind für Räume des Gesundheitswesens in der DIN 5035-3, enthalten. Für Kunstlicht gelten, ebenso wie an die Beleuchtung, erhöhte Anforderungen. [DIN 5035-3, Anhang A]

Da eine optischen Begutachtung der Patienten durch das Personal erforderlich ist, wird ein möglichst neutrales, tageslichtähnliches Spektrum empfohlen. Für die allgemeine Beleuchtung der Verkehrsflächen, Aufenthaltsflächen etc. sind Beleuchtungsstärken von etwa 200 bis 700 Lux vorzusehen. Räume mit besonderen Anforderungen, z.B. Behandlungsräume, sollten höhere Beleuchtungsstärken von mindestens 1000 Lux aufweisen. Darüber hinaus sind für Beleuchtungsanlagen im Gesundheits-

wesen ein Wartungsfaktor⁷ und eine Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke⁸ von 70 % einzuhalten. [DIN 5035-3]

Für Patientenzimmer im Speziellen wird in der Norm eine Beleuchtungsstärke aus der Allgemeinbeleuchtung von 100 bzw. auf Säuglingsstationen von 200 *Lux* in einer Höhe von 0,85 *m* über dem Boden empfohlen. Um Blendung zu vermeiden, sollte die Leuchtdichte höchstens 1000 $\frac{cd}{m^2}$, an Deckenflächen höchstens 500 $\frac{cd}{m^2}$ betragen und der Blendindex (*UGR*) unterhalb von 80 [–] liegen. Als Kennwert des Farbspektrums sind Richtwerte für Farbwiedergabeindizes von 80-90 [–] definiert. Neben der Allgemeinbeleuchtung ist eine Untersuchungs- und Behandlungsbeleuchtung mit Beleuchtungsstärken von mindestens 300(U) bzw. 1000(B) *Lux* gefordert. Zudem sollte für die Patienten eine Lesebeleuchtung (>300 *Lux* in 1 *m* Höhe über Boden) und eine Nachtbeleuchtung (>5, für Säuglingsstationen >20 *Lux*) installiert sein. [DIN 5035-3]

2.2.4. Brandschutzanforderungen an den Pflegebereich

Bestimmungen zum Brandschutz von Krankenhäusern und insbesondere Pflegeeinheiten enthalten die Krankenhausbaurichtlinien der Länder. Die Sächsische Krankenhaus- und Pflegebaurichtlinie bestimmt unter anderem die Feuerbeständigkeit für verschiedene Bauteile wie Trennwände zwischen Funktionseinheiten (hoch feuerhemmend) tragende Bauteile im Erdgeschoss und Trennwände des Bettenbereichs (feuerhemmend), tragende Bauteile in den übrigen Geschossen und Bauteile in Intensivbereichen (beide feuerbeständig). Generell sind Wandbekleidungen, Dämmstoffe, Deckenbekleidungen etc. mit nicht brennbaren Materialien und Bodenbekleidungen mindestens mit schwer entflammaren Baustoffen, in stark begangenen Zonen mit nicht brennbaren Baustoffen, zu versehen. [SächsKhPfBauR, 2007, §§ 2.1 und 2.2]

Des Weiteren enthält die Richtlinie Bestimmungen zu Brandabschnitten (mindestens zwei Abschnitte je Geschoss, unmittelbar miteinander verbunden und jeweils mit eigenem Treppenraum), zur Rettungswegführung (Flure, Treppen, separate Ausgänge aus Gemeinschaftsräumen, Intensiv- und Funktionsbereichen, je Geschoss mindestens zwei unabhängige Rettungswege), zu Mindestabmessungen von Rettungsfluren

⁷Der Wartungsfaktor beschreibt das Verhältnis der gemessenen Beleuchtungsstärke eines über einen längeren Zeitraum genutzten Leuchtmittels zur erreichten Beleuchtungsstärke im Neuzustand auf einer Bezugsfläche [DIN 5035-3].

⁸Diese Gleichmäßigkeit beschreibt das Verhältnis der minimalen zur mittleren Beleuchtungsstärke in einem Raum. [DIN 12665]

2. Baulich- funktionelle und bauklimatische Besonderheiten von Krankenhausbauten

(mindestens 2,25 m, keine Einengung durch Türen u.a.), Türen, Treppen, Aufzügen sowie Feuermelde- und Brandlöschanlagen. [SächsKhPfBauR, 2007, §§ 2.3 bis 4]

2.2.5. Schallschutzanforderungen an den Pflegebereich

Zur Gewährleistung eines ausreichenden Schallschutzes innerhalb von Pflegestationen kann die DIN 4109-1 hinzugezogen werden. Sie definiert Grenzwerte für den Luftschallschutz zu angrenzenden Räumen und zum Außenbereich sowie für den Trittschallschutz zu angrenzenden Räumen. Räume des Gesundheitswesens sind auf Grund ihrer erhöhten Anforderungen gesondert aufgeführt. Die Grenzwerte für den Luftschallschutz belaufen sich je nach Bereich auf 35 bis 47 dB, jene für den Trittschallschutz auf 55 - 60 dB und jene für den Außenraumschallschutz je nach Pegelbereich des Außenraums auf 35 bis 50 dB. [DIN 4109-1, 2008]

2.2.6. Anforderungen an die Barrierefreiheit

Die Barrierefreiheit spielt einerseits für eingeschränkt mobile Personen eine Rolle und ist andererseits für einen reibungslosen Ablauf innerhalb des Klinikums unerlässlich (Betttransport).

Für öffentlich zugängliche Gebäude enthält die DIN 18040-1 Planungsrichtlinien. Diesen Richtlinien zu Folge sollten Gebäude grundsätzlich so geplant werden, dass sie von behinderten Menschen⁹ gefahrlos selbständig erschlossen und genutzt werden können. [DIN 18040]

Für die Gestaltung der Verkehrsflächen ist der Platzbedarf von Menschen mit Rollstühlen und Gehhilfen von besonderem Interesse. Hauptflure sollten ausreichend Platz für die Begegnung zweier Rollstuhlfahrer (Mindestbreite 1,80 m) oder zumindest von Rollstuhlfahrer und Fußgänger (Mindestbreite 1,50 m) bieten. Für Durchgänge und Türöffnungen beträgt die Mindestbreite 90 cm und es sollte eine Bewegungsfläche (1,20 m tief, 1,50 m breit) zu beiden Seiten vorhanden sein. Das Gebäude sollte stufenlos und schwellenlos begehbar sein. Sind Rampen erforderlich, so sollten diese eine Neigung unter 3 % aufweisen. [DIN 18040]

⁹Damit sind Menschen mit Sehbehinderungen, Gehörbeeinträchtigungen und motorischen Einschränkungen (einschließlich Rollstuhlfahrer) gemeint. [DIN 18040; S. 3]

Neben diesen Anforderungen sollte es im Gebäude Orientierungssysteme gemäß des Zwei- Sinne- Systems¹⁰ geben. So kann die Orientierung durch Bodenstrukturen, akustische Signale, kontrastreiche Gestaltung (z.B. Stufen und Absätze), Absetzung baulicher Elemente (z.B. Türzargen) und andere Hilfsmittel unterstützt werden. [DIN 18040]

Besondere Anforderungen werden zudem an Bodenbeläge, Rampen, Treppen und Handläufe, Aufzüge und Abstellplätze sowie Bedienelemente, Kommunikationsanlagen und sonstige Ausstattungsobjekte gestellt. [DIN 18040]

Für Pflegebereiche sind neben den allgemeinen Anforderungen die Erfordernisse für den Sanitärbereich zu beachten. So dürfen Drehflügeltüren nicht in den Sanitärbereich aufschlagen, sollten von außen zu entriegeln sein und sollten Einhebel- oder berührunglose Armaturen Verwendung finden. Eine Rangierfläche von 1,50 m Breite und Tiefe ist auch vor den Sanitäreobjekten erforderlich. Toilette, Waschbecken und Dusche unterliegen weiteren Anforderungen, z.B. Unterfahrbarkeit der Waschbecken und Rangierplatz beidseitig neben dem WC. [DIN 18040]

2.2.7. Gestalterische Anforderungen an den Pflegebereich

Die Gestaltung des Pflegebereichs sollte den Patienten die Orientierung im Gebäude, beispielsweise durch Sichtbeziehungen zum Außenraum, erleichtern. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Fluchtwege. So sollten Ausgänge, Treppenhäuser und auch Zimmertüren gut einsehbar und klar angeordnet sein. Der Ausblick aus dem Patientenzimmer sollte einerseits fördernd auf den Heilungsprozess wirken, z.B. durch Naturbezug. Andererseits sollte er ein gewisses Maß an Ablenkung bieten. [Rauh, 2001] [Schmiege u. Maderer, 2001]

In Mehrbetträumen ist der Anordnung der Betten ein besonderes Augenmerk zu schenken. Diese sollte einerseits die Kommunikation der Patienten untereinander fördern und andererseits eine räumliche Privatsphäre bieten. Der erste Aspekt wird durch eine direkte Sichtverbindung der Patienten zueinander gewährleistet. Der zweite Aspekt ist über eine möglichst große Entfernung der Betten voneinander und eine geschickte Bereichsbildung, gegebenenfalls durch zusätzliche Raumtrennelemente, realisierbar. [Rauh, 2001] [Schmiege u. Maderer, 2001]

¹⁰Damit ist eine Informationsvermittlung gemeint welche von zwei unterschiedlichen Sinnen, z.B. Sehen und Hören oder Sehen und Fühlen, erfasst werden kann.[DIN 18040; Punkt 3.12]

2. Baulich- funktionelle und bauklimatische Besonderheiten von Krankenhausbauten

Die nachfolgende Abbildung 2.2 enthält eine schematische Darstellung dieser Blickbeziehungen (linke Abbildung) sowie der Rückzugs- und Kommunikationsbereiche (rechte Abbildung) für ein typisches I-förmiges Zweibettzimmer. Kommunikations- und Privatbereich liegen in diesem Raumtyp sehr eng beieinander. Ausblick und Zugangseinblick stellen sich für die Bettseite am Sanitärtrakt deutlich eingeschränkter dar.

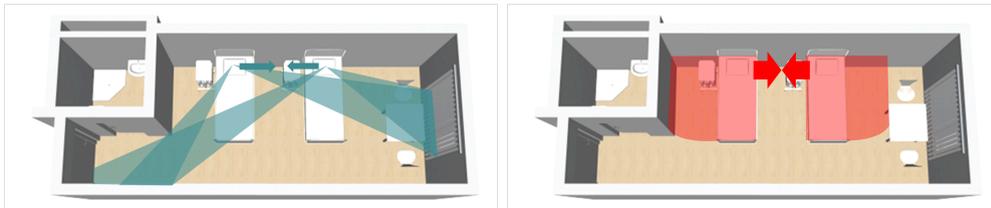


Abbildung 2.2.: Gestalterische Anforderungen. Links: Sichtbeziehungen im Patientenzimmer mit Ausblick, Sichtbeziehung zum Bettnachbarn und Einsicht des Zugangsbereichs. Rechts: Privat- und Kommunikationsbereich im Patientenzimmer

2.2.8. Belichtungsanforderungen an den Pflegebereich

Allgemeine Empfehlungen zur Tageslichtversorgung von Räumen enthält die Norm DIN 5034-1. Darin ist festgehalten, dass für Aufenthaltsräume eine ausreichende Tageslichtversorgung sowie eine möglichst verzerrungsfreie und farbneutrale Sichtverbindung zum Außenraum erforderlich sind. Diese allgemeinen Vorgaben werden in der Norm in bauliche Richtwerte überführt. Einige dieser Richtwerte für Patientenzimmer sind in Abb. 2.3 dargestellt. [DIN 5034-1, Anhang A]

Für Patientenzimmer sind laut Norm eine Brüstungshöhe von höchstens $0,7\text{ m}$, eine Mindestverglasungsbreite von 55% der Raumbreite, eine Mindeststurzhöhe von $2,20\text{ m}$, ein mittlerer Tageslichtquotient von $0,9\%$ und ein minimaler Tageslichtquotient von $0,75\%$ (in Raummitte und $0,85\text{ m}$ Höhe), ferner ein Sichtschutz gegen den Einblick von außen und eine minimale Besonnungsdauer von vier Stunden zur Tages- und Nachtgleiche sowie von einer Stunde am 17. Januar definiert. [DIN 5034-1, Anhang A]

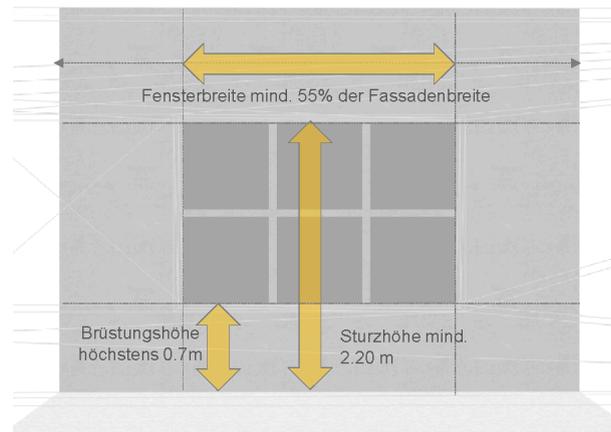


Abbildung 2.3.: Mindestabmessungen der verglasten Fassadenfläche im Patientenzimmer gemäß DIN 5034-1.

2.2.9. Anforderungen an die Beheizung und Raumlufttechnik

In Räumen des Gesundheitswesens ist nicht nur die Einhaltung eines behaglichen und gesundheitlich zuträglichen Klimas eine Prämisse für den Einsatz von Heizanlagen und Raumlufttechnik. In Abhängigkeit des Bereiches müssen auch Funktionalitäten wie die Abführung von Geruchsstoffen, schädigenden Gasen, Mikroorganismen, partikulären Belastungen sowie das Management der thermischen Lasten und des Energieverbrauchs sichergestellt sein. [DIN 1946]

Für diese Zwecke werden nach DIN 1946-4 gemäß den Anforderungen an die Keimarmut drei Raumkategorien definiert, Raumklassen 1a und 1b für Operationsbereiche sowie Raumklasse 2 für alle übrigen Bereiche. Die Operationsbereiche erfordern im Minimum eine mechanische Be- und Entlüftung, gegebenenfalls auch eine RLT-Anlage. Insbesondere in hygienischer Hinsicht sind die Installations- und Wartungsanforderungen an diese Anlagen sehr hoch. [DIN 1946]

Für Patientenzimmer ist laut Norm Raumklasse 2 anzuwenden. Explizite Richtwerte enthält die Norm jedoch ausschließlich für die Bettzimmer der Intensivbereiche. Es sind ein Mindestaußenluftwechsel von $40 \frac{m^3}{h \cdot Pers}$, ein Raumlufttemperaturbereich von 22 bis 26°C und ein Raumluftfeuchtebereich von 30 bis 60 % angegeben. Diese Bedingungen dürfen nur an wenigen Tagen im Jahr über- bzw. unterschritten werden. [DIN 1946, Tabelle 1]

2.2.10. Anforderungen an das Raumklima im Pflegebereich

Wird das Patientenzimmer auch als permanente Arbeitsstätte des Krankenhauspersonals gesehen, so können einige Raumklimaanforderungen aus den Bestimmungen zum Arbeitsschutz abgeleitet werden. Allgemeine Arbeitsschutzanforderungen an das Raumklima beinhaltet die Arbeitsstättenverordnung, einschließlich dazugehöriger Richtlinien ([AStV 2004]). Darin werden Aspekte wie eine „(...) gemäß des spezifischen Nutzungszwecks des Raumes (...) gesundheitlich zuträgliche Raumlufttemperatur“, sowie „(...) eine Abschirmung gegen übermäßige Sonneneinstrahlung (...)“ [ASR A3.5, 2010, Anhang §3, Abs.1, Punkt 3.5] und das Vorhandensein einer „(...) ausreichend gesundheitlich zuträgliche[n] Außenluft (...)“ [ASR A3.5, 2010, Anhang §3, Abs.1, Punkt 3.6] genannt.

Darüber hinaus gibt es unterschiedliche Normen, z.B. ASHRAE 55, EN ISO 7730 und EN 15251, welche Empfehlungen zur Gewährleistungen eines optimalen Raumklimas enthalten. Für Räume mit stetigen Raumklimabedingungen (beheizte, klimatisierte Zonen) empfehlen die Normen ISO 7730 und ISO 15251 die Berechnung eines Behaglichkeitsindex, dem Predicted Mean Vote (PMV). [ISO 7730, ISO 15251]

ISO 7730 bietet die Einteilung der Nutzersensibilität in drei verschiedene Gruppen A-C¹¹ an. Für jede dieser Gruppen werden Empfehlung für den optimalen PMV-Wertebereich sowie für Bedingungen der lokalen thermischen Behaglichkeit aufgeführt. Anhang H dieser Norm enthält darüber hinaus Methoden zur Langzeitbewertung des Raumklimas¹²

In Ergänzung dieser Norm können die Empfehlungen für nicht klimatisierte Gebäude der EN 15251 entnommen werden. Auch diese Norm führt Raumklimakategorien auf¹³ und stellt Methoden zur Langzeitbewertung¹⁴ dieser Raumkategorien zur Verfügung. Im Gegensatz zur ISO 7730 werden hierin auch Empfehlungen zur Bewertung des Schallschutzes, zur Raumluftqualität und der Tageslichtversorgung

¹¹Kategorie A entspricht Bauwerken mit empfindlichen Nutzergruppen wie z.B. Älteren. Für die übrigen Kategorien sind keine Empfehlungen enthalten [ISO 7730]

¹²Gemäß Verfahren A wird der Prozentsatz von Zeitwerten außerhalb des Raumklimaoptimums der Gesamtperiode angegeben. Verfahren B und C berücksichtigen neben dem Prozentsatz auch den Überschreitungsbetrag des Temperaturoptimums (B) bzw. des PMV- Optimums (C) mittels Wichtungsfaktor. Verfahren D und C bieten eine Mittlung oder Aufsummierung des PPD- Index über die Periode an.[ISO 7730, Anhang H].

¹³Es werden fünf Kategorien, I-IV, genannt und allgemeinen Nutzerbeschreibungen zugeordnet. [ISO 15251]

¹⁴Diese entsprechen den Methoden welche in der ISO 7730 genannt sind. [ISO 15251, Anhang F]

2.2. Funktionelle Anforderungen

getroffen. In der Bewertung von nicht klimatisierten Räumen wird auf ein Modell zurückgegriffen, welches eine lineare Abhängigkeit zwischen dem Optimum der Operativtemperatur¹⁵ und der Außenlufttemperatur annimmt. Als Hilfestellung für den Planer werden diese Empfehlungen in Wertebereiche überführt. Räume des Gesundheitswesens sind in dieser Aufstellung nicht enthalten. Für die Zonen der höchsten Kategorie (I) sind im Falle einer raumluftechnischen Ausstattung Temperaturbereiche von $20^{\circ}C$ bis $26^{\circ}C$ für den Sommerfall, Förderströme von 0,5 bis $2,0 \frac{l}{m^2sek}$, CO_2 -Konzentrationen von maximal 350 *ppm* sowie relative Luftfeuchten von 30 bis 50 % angegeben. Diese Wertangaben beziehen sich explizit auf die Auslegung der Anlagentechnik, d.h. Lüftungsanlagen, Klimaanlage u.a. [ISO 15251]

¹⁵Die operative Temperatur oder empfundene Temperatur beschreibt das Mittel aus Raumlufttemperatur und gemittelter Temperatur der umgebenden Konstruktionsflächen.

2.3. Zusammenfassung der planerischen Anforderungen an das Patientenzimmer

Die erläuterten Literaturquellen enthalten zahlreiche Richtwerte zur baulichen Auslegung von Pflegebereichen und insbesondere Patientenzimmern. Dazu gehören Hinweise zur Realisierung einer hygienischen Umgebung, einer guten Kunstlichtversorgung, eines ausreichenden Brand- und Schallschutzes sowie einer zufrieden stellenden Tageslichtversorgung. Die Hinweise konnten als explizite Richtwerte den jeweiligen Quellen entnommen werden.

Für die Auslegung des Raumklimas werden diese expliziten Grenzwerte nicht bereitgestellt. Die hierfür existierenden normativen Richtwerte beschränken sich auf Patientenzimmer der Intensivbereiche (ISO 7730) oder entbehren notwendiger Anwendungshinweise (EN 15251). Das erschwert die planerische Auslegung des Raumklimas in allgemeinen Patientenzimmern. Dieser Umstand steht im Gegensatz zu den über die Tageslichtnorm geforderten Kennwerten. Die dort aufgeführten Maße einer maximalen Brüstungshöhe, einer minimalen Sturzhöhe und einer minimalen Glasflächenbreite implizieren die Gefahr überdimensionierter Fensterflächen. Sie sollten adäquaten Raumklimaanforderungen gegenüber stehen.

Eine Richtwertübersicht für Patientenzimmer enthalten die nachfolgenden Tabellen 2.3-I und 2.3-II.

2.3. Zusammenfassung der planerischen Anforderungen an das Patientenzimmer

Entwurfsaspekt	Entwurfsanforderungen	Wertvorgaben	Quellen
Funktionalität	Mindestgröße	$8 \frac{m^2}{Pers}$	[Neufert u. Neufert, 2012]
	Bet Zugang von drei Seiten (Pflegebettstellung)	Umgang mit ca. $b = 0,5 m$	
	Betten separat voneinander aus Zimmer fahrbar	Trasse mit ca. $b = 1,0 m$	
	Sanitärbereich	Zugang aus Raum	
Hygiene	Medienschiene, Nachtschrank	Zugriff vom Bett aus	
	Modularität - Bauwerksraster	etwa $1,20 m$	
	Maximalbelegung	$4 \frac{Pers}{Zimmer}$	[KHR 2003]
	Mindestbettabstand	$1,0 m$	
Kunstlicht	Vorhandensein Sanitärzelle	Zugang aus Raum	
	Desinfizierbarkeit der Ausstattung	keine Textilbeläge u.a.	
	Mindestbeleuchtungsstärke	100 bzw. $200 Lux$	[DIN 5035-3]
	Maximale Leuchtdichte	500 bzw. $1000 \frac{cd}{m^2}$	
	Maximaler Blendindex	$80 [-]$	
	Farbneutralität	Farbwiedergabeindex	
Brandschutz	Bauteilfeuerbeständigkeit	mind. feuerhemmend	[SächsKhPFBauR, 2007]
	Feuerbeständigkeit Wände, Decken	nicht brennbar	
	Feuerbeständigkeit Böden	schwer entflammbar	
	Feuermelde- und Brandlöschanlagen	-	
Schallschutz	Mindestluftschallschutz	mind. $35 - 47 dB$	[DIN 4109-I]
	Mindestaufenraumschallschutz	mind. $35 - 50 dB$	
	Mindesttrittschallschutz	mind. $55 - 60 dB$	

Tabelle 2.3-I: Zusammenfassung der Anforderungen an das Patientenzimmer - Teil I

2. Baulich- funktionelle und bauklimatische Besonderheiten von Krankenhausbauten

Entwurfsaspekt	Entwurfsanforderungen	Wertvorgaben	Quellen
Barrierefreiheit	Rangierfläche vor Türen Rangierfläche im Sanitärbereich Türmindestbreite Rangierfläche Sanitärbereich Passierbarkeit Türaufschlag (Drehflügeltüren)	1, 20 m x 1, 50 m 1, 50 m x 1, 50 m 90 cm 1, 50 m x 1, 50 m keine Stufen, Schwellen nicht in Sanitärbereich	[DIN 18040-1]
Tageslicht	Brüstungshöhe (höchstens) Sturzhöhe (mindestens) Mindestverglasungsbreite der Fassade Tageslichtquotient (Min) Sichtschutz Mindestsonneneinfalldauer	0, 7 m 2, 2 m 55 % 0, 9 % Verschattung raumweise 1 h am 17.01.	[DIN 5034-1]
Raumklima	Raumlufttemperatur Raumluftfeuchte Mindestluftwechsel Raumlufttemperatur ohne Klimatisierung	22 bis 26°C 30 bis 60 % 40 $\frac{m^3}{h \cdot Person}$ siehe Normgleichung	[DIN 7730] [DIN 15251]

Tabelle 2.3-II: Zusammenfassung der Anforderungen an das Patientenzimmer - Teil II

2.4. Gegenwärtige architektonische Gestaltung der Patientenzimmer

In Anbetracht der Vielzahl von Anforderungen an den Pflegebereich von Krankenhäusern ist die Umsetzungspraxis von Interesse. Insbesondere steht die Frage im Raum, ob diese Anforderungen in Form vielfältiger, architektonisch und funktionell hochwertige Patientenzimmerbereiche verwirklicht wurden. Zu diesem Zweck wurde nachfolgend eine Auswahl größerer Klinikprojekte des vergangenen Jahrzehnts betrachtet.

Die in Tabelle 2.4 aufgeführte Projektauswahl umfasst die vorrangig verwirklichten Grundrisstypen, die Anteile der verglasten Fläche an der Fassadenfläche (Fensterflächenanteil) und die vorrangig umgesetzte Raumkapazität, d.h. Bettanzahl pro Zimmer, der jeweiligen Bauten bzw. Gebäudekomplexe. Die Fensterflächenanteile wurden an Hand der Konstruktionszeichnungen geschätzt. Die Raumkapazitäten wurden den Entwurfsbeschreibungen und Grundrissen entnommen. Eine Klassifizierung der Grundrisse erfolgte an Hand der nachfolgend erläuterten Typenaufstellung.

Die I-Typen entsprechen länglichen Räumen in denen eine Stirnseite die Zugangsseite und die zweite Stirnseite die Fassadenfront ist. An der Längsseite der I-Typen sind die Betten angeordnet. Der Sanitärtrakt befindet sich in diesem Zimmertyp meist im Zugangsbereich und bietet gleichzeitig einen Sichtschutz für die dahinter liegenden Kopfbereiche der Betten. Eine Darstellung dieses Raumtyps, ausgelegt für zwei Patienten, enthält Abbildung 2.4.

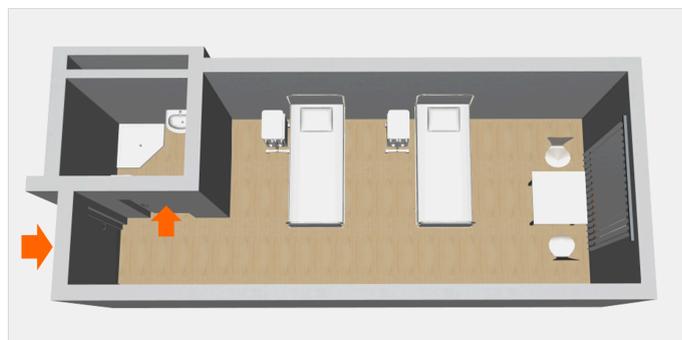


Abbildung 2.4.: Beispiel für einen I-förmigen Patientenzimmergrundriss mit zwei Betten. Der große Pfeil markiert den Raumzugang, der kleine den Zugang zum Sanitärtrakt. Der Grundriss ist an die in [Nickl-Weller, 2007] und [Broto, 2009] aufgeführten Projekte angelehnt.

2. *Baulich- funktionelle und bauklimatische Besonderheiten von Krankenhausbauten*

Meist befindet sich die Versorgungsleiste in diesem Zimmertyp an der Längsseite hinter dem Sanitärtrakt, weshalb die Variabilität der Bettenstellung auf diese Seite begrenzt ist. Im I-Raumtyp ist das fassadenseitige Bett in Bezug auf den Ausblick, den Zugang zur Fassade zwecks Lüftung und Sonnenschutzsteuerung sowie in Bezug auf die Privatzone am Bett deutlich bevorteilt. Eine Stärke des I-Zimmertyps ist in der großen Raumtiefe und der damit möglichen Baukörperkompaktheit zu sehen. Die raumbezogene Fassadenfläche, d.h. die realisierbare Glasfläche, ist folglich relativ gering.

Der O-Typ entspricht einem Patientenzimmer mit nahezu quadratischem Grundriss. Der Sanitärtrakt besitzt eine geringe oder gar keine raumzonenbildende Wirkung, beispielsweise indem er in den Gang hineinragend angegliedert wird. Die Versorgungsleisten befinden sich in diesem Zimmertyp auf beiden Längsseiten. Die Bettenstellung ist damit variabler und kann beispielsweise auch parallel zur Längsseite gewählt werden. Die Qualität der beiden Betten ist in Bezug auf den Ausblick, die Privatzone und den Zugang zur Fassade deutlich ausgeglichener. Die realisierbare Raumtiefe ist geringer, die realisierbare Fensterfläche größer als im klassischen I-Typ. Ein Beispiel für ein Zweibettzimmer diesen Typs enthält die nachfolgende Abbildung 2.5, links.



Abbildung 2.5.: Links: Beispiel für einen O-förmigen Patientenzimmergrundriss für zwei Personen. Rechts: Beispiel für einen V-förmigen Patientenzimmergrundriss für zwei Personen. Der große Pfeil markiert den Raumzugang, der kleine den Zugang zum Sanitärtrakt. Die Grundrisse sind an die in [Nickl-Weller, 2007] und [Broto, 2009] aufgeführten Projekte angelehnt.

2.4. Gegenwärtige architektonische Gestaltung der Patientenzimmer

Der V-Zimmertyp besteht aus zwei länglichen Raumzonen, welche in einem spitzen Winkel aneinander gestellt sind. Die Sanitärzone kann hier sowohl fassadenseitig als auch gangseitig angegliedert sein. Versorgungsleisten sind in diesem Typ beidseitig vorhanden. Die Bettenstellung ist beschränkt veränderbar. Ausblick, Privatzone und Fassadenzugang sind in diesem Typ für beide Betten vergleichbar. Die realisierbare Raumtiefe ist geringer, die mögliche verglaste Fläche damit höher als im I-Typ. Ein Beispiel für ein Zweibettzimmer diesen Typs enthält Abbildung 2.5, rechts.

Aus der Projektübersicht ist erkennbar, dass vorrangig Zweibettzimmer im I-Typ umgesetzt wurden. Diese Tendenz lässt vermuten, dass die Planer als Folge der Vielzahl von insbesondere ökonomischen Anforderungen, vorzugsweise auf bewährte Grundriss schemata zurückgreifen. Da der I-Typ die verhältnismäßig kleinste Fassadenfläche aufweist, sind mit diesem Typus kompakte Baukörper realisierbar und vergleichsweise günstige Voraussetzungen für den baulichen sommerlichen Wärmeschutz gegeben. Beides sind wahrscheinlich Gründe für die Durchsetzung dieses Zimmertyps.

Der durchschnittliche Fensterflächenanteil der Patientenzimmer ist mit geschätzten 80 % sehr hoch. Es ist daher anzunehmen, dass die Mehrzahl der Projekte nicht bezüglich des Sommerlichen Wärmeschutzes sondern hinsichtlich der Tageslichtnutzung bzw. des Ausblicks optimiert wurde. Ein Indiz für diese Annahme ist darin zu sehen, dass in nahezu allen Fällen keine Unterschiede in der Fassadengestaltung der verschiedenen Ausrichtungen zu erkennen sind.

2. Baulich- funktionelle und bauklimatische Besonderheiten von Krankenhausbauten

Projekt	Planungsbüro	Bauzeit	Grund- risstyp	FF- Anteil	Betten- anzahl
Medizinische Klinik der Universität Heidelberg (Heidelberger Klinikring)	ARCASS Freie Arch.	2000 - 2004	I-Typ	80 %	2-BZ
Albkllinik Münsingen (Chirurgie, Innere Medi- zin, Anästhesie, Geburtshilfe)	G. Keppler, SPS, W. Scholderer	2000 - 2005	I-Typ	70 %	1-BZ, 3-BZ
Universitätsklinik Ulm (Chirurgie)	KSP Engel & Zimmermann Arch.	2007 - 2011	I-Typ	90-100 %	2-BZ
Orthopädische Kinderklinik Aschau	Nickl & Partner Arch.	2002 - 2004	I-Typ	60 %	2-BZ
Friedrich- Alexander- Universität Erlangen (EB)	BMBW- Arch. BDA & Partner	1997 - 2009	I-Typ	50-60 %	2-BZ
Agatharied (Psychiatrische Klinik)	Nickl & Partner Arch.	1994 - 1998	V-Typ	60-100 %	2-BZ
Universitätsklinikum Würzburg (Chirurgie)	Schuster, Pechtold, Schmidt Arch.	1998 - 2008	I-Typ	50-60 %	2-BZ
Vivantes Klinikum Neukölln (Frauen- und Kin- derklinik)	Schmucker Partner PGr	2003 - 2005	I-Typ	90-100 %	2-BZ
Robert- Koch Klinik Leipzig (Bettenhaus)	HPP Laage & Partner PGr	1998 - 2008	I-Typ	90-100 %	2-BZ
Universitätsklinikum Leipzig (Frauen- und Kin- derklinik, Konservative Medizin)	Woerner & Partner	2003 - 2009	I-Typ	50 %	2-BZ
Klinikum der Philipps- Universität Marburg (Frauen- und Kinderklinik)	PGr Eggert & Partner	2002 - 2005	O-Typ	70-80 %	2-BZ
Ostholsteinklinik Entin	Schmittger Arch.	1999 - 2002	I-Typ	90-100 %	2-BZ
Robert- Koch- Krankenhaus Appolda	Schuster, Pechtold, Schmidt Arch.	1999 - 2003	I-Typ	50-60 %	2-BZ
Kath. Krankenhaus St. J. Nepomuk, Erfurt	TMK Arch.	1999 - 2003	I-Typ	80 %	2-BZ
Helios Krankenhaus Gotha/ Ohrdruf	Woerner & Partner	1999 - 2002	I-Typ	90 %	2-BZ

Tabelle 2.4: Projektübersicht nach [Nickl-Weller, 2007], [Broto, 2009]

3. Verfahren zur Bemessung des Sommerlichen Wärmeschutzes

Das nachfolgende Kapitel stellt einen Überblick über die derzeit verfügbaren Verfahren zur Bewertung des Sommerlichen Wärmeschutzes einer Zone bereit. Es werden fünf Handrechenverfahren sowie ein Simulationsmodell vorgestellt und deren Ansätze und Vereinfachungen erläutert.

3. Verfahren zur Bemessung des Sommerlichen Wärmeschutzes

3.1. Verfahrensüberblick

Eine Auswahl von Verfahren zur Bewertung des baulichen Sommerlichen Wärmeschutzes stellt die nachfolgende Abbildung dar. Darin sind die Verfahren gemäß ihres Einsatzes im Gebäudezyklus sowie im Kontext ihres potenziellen Detaillierungsgrades und Maßstabs eingeordnet. Es sind zwei Verfahrensgruppen zu erkennen, die Handrechenverfahren, vorwiegend in den frühen Planungsphasen eingesetzt und auf die Bewertung einzelner Räume beschränkt, sowie die Simulationsverfahren, vorwiegend in den späten Planungsphasen eingesetzt und von der Einzelraumbewertung bis hin zur Stadtfeldbewertung anwendbar.

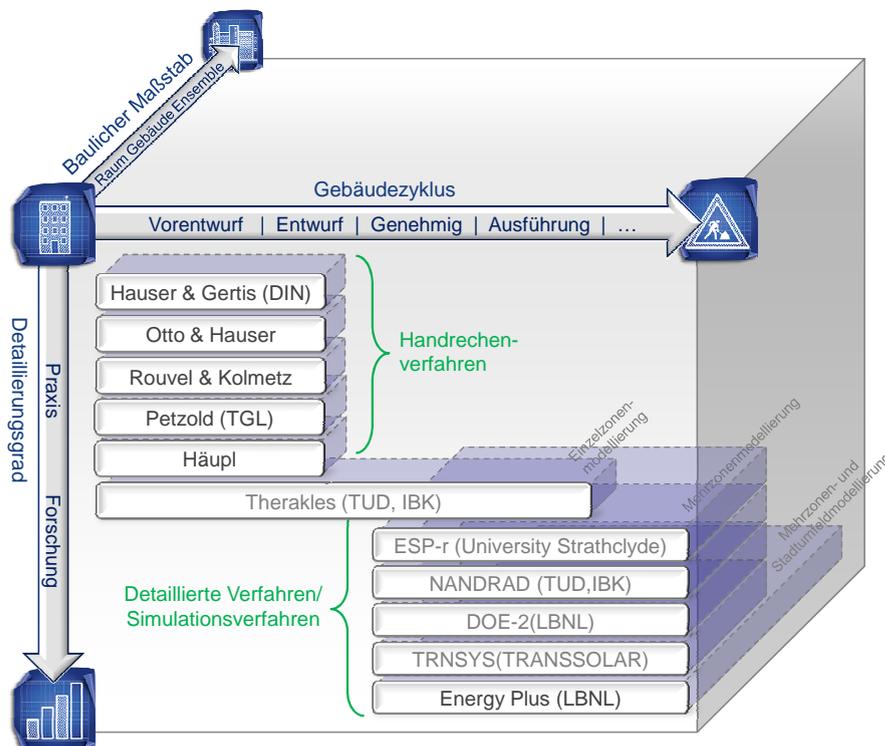


Abbildung 3.1.: Einordnung ausgewählter Verfahren zur Bewertung des Sommerlichen Wärmeschutzes gemäß Gebäudezyklus, Detaillierungsgrad und baulichem Maßstab.

Bei den nachfolgend erläuterten Handrechenverfahren handelt es sich um die Ermittlung des mittleren grundflächenbezogenen Wärmestroms nach Petzold (TGL-Verfahren), der Übertemperaturgradstunden nach Rouvel und Kolmetz sowie Hauser und Otto, der Sonneneintragskennwerte nach Hauser und Gertis (DIN-Verfahren)

sowie der Tagesmitteltemperatur nach fünftägiger Aufheizphase nach Häupl. Aus den verfügbaren Simulationsverfahren wurde beispielhaft Energy Plus (Vers. 7.1) ausgewählt.

3.2. Handrechenverfahren

Im frühen Entwurfsstadium sind zahlreiche Entscheidungen zu treffen, welche das resultierende Klima im Gebäude maßgeblich beeinflussen. Daher sollten Methoden zur Optimierung des baulichen Sommerlichen Wärmeschutzes bereits in dieser Phase ansetzen. Die Schwierigkeit besteht in der Gratwanderung zwischen der Praktikabilität und der Aussagefähigkeit eines solchen Verfahrens. Die Sicherstellung der Aussagefähigkeit ist in Hinblick auf die noch unvollständige Datenlage während der Entwurfsphase schwierig.

Grundsätzlich stehen dem Planer zwei Wege zur Bemessung offen. Er kann eine vereinfachte Bemessung des Sommerlichen Wärmeschutzes mittels Vorbemessungsverfahren führen oder eine detaillierte Rechnung mittels detailliertem Bemessungsverfahren (z.B. Simulationsmodell) erbringen.

Die nachfolgend erläuterten Bemessungsverfahren stimmen in ihrem Nachweisprinzip überein. Sie stellen die für eine typische Sommerphase zu erwartenden Wärmegewinne den Wärmeverlusten eines Raums gegenüber. Im Simulationsverfahren wird diese Bilanz für jeden Zeitschritt berechnet und beinhaltet komplexere physikalische Zusammenhänge, z.B. zur Ermittlung der Lüftungswärmeströme aus Auftrieb und Winddruckverhältnissen. In den Handrechenverfahren werden die Wärmegewinne und -verluste über einen gewählten Zeitraum gemittelt und Vereinfachungen für die physikalischen Zusammenhänge getroffen, z.B. in Form konstanter Luftwechselraten welche weder außenklima- noch nutzungsabhängig sind.

Die Bestandteile der Nachweisführung sind ebenfalls in allen Verfahren übereinstimmend. Im ersten Schritt werden relevante Konstruktionseigenschaften, Nutzungsbedingungen und Klimarandbedingungen zusammengetragen. Im Nachweis werden daraus die für die Zone zu erwartenden Gewinne und Verluste berechnet. Anschließend wird aus diesen Bilanzanteilen ein Kennwert berechnet, welcher mit einem zulässigen Wert abzugleichen ist. Diese Kennwerte sind unterschiedlich und können ohne physikalische Bedeutung (z.B. Sonneneintragskennwert) oder physikalisch interpretierbar (z.B. Tagesmittel der Wärmeströme) sein.

3. Verfahren zur Bemessung des Sommerlichen Wärmeschutzes

3.2.1. Verfahren nach Petzold

Die Grundannahme Petzolds besteht darin, dass es einen überwiegend unveränderlichen baulichen Zustand gibt, welcher die äußeren Lasten am Standort ausreichend regulieren muss. Dem gegenüber stehen die aus der Nutzung erzeugten inneren Lasten, welche als veränderlich gelten und durch die Lüftung abgeführt werden können. [Petzold, 1983]

Die auftretende äußere Wärmelast kann Petzolds Ansatz zufolge vollständig durch die speicherwirksame Masse kompensiert werden, d.h. Speichermasse und äußere Wärmelasten des Raumes werden aufeinander abgestimmt. Die innere Wärmelast wird hingegen als konstant anfallende Wärmelast auf die Lüftung abgestimmt. Es bietet sich, seinem Ansatz zufolge, die Beschränkung auf resultierende Tagesmittelwerte und die Vernachlässigung der Temperaturmaxima an, da Letztere ohnehin stark von Lüftungsgewohnheiten und lokalklimatischen Besonderheiten geprägt sind. Die maximal zulässigen Tagesmitteltemperaturen sollten Petzolds Ansatz zufolge für frei klimatisierte Bauten zwischen 24 und 30°C liegen. [Petzold, 1983]

In der Nachweisführung wird für einen kritischen Raum und für einen typischen Sommertag die auftretende mittlere äußere Wärmelast dem zulässigen Wert gegenübergestellt. Letzterer ergibt sich aus der Speicherfähigkeit des Raumes sowie aus dem erforderlichen Wärmeschutzniveau¹.

$$q_{Zone,e}(Q_{Tra}, Q_{Sol}, Q_{NZ}) < q_{Zone,max}(C_{Zone}) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (3.1)$$

$$q_{Zone,i}(Q_{Pers}, Q_{Equ}, Q_{Li}) < q_{Zone,max}(Q_{Vent}) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (3.2)$$

Die vorhandene äußere Wärmelast berechnet sich aus der Wärmelast durch Transmission Q_{Tra} , der Wärmelast durch Strahlung Q_{Sol} sowie der Wärmelast aus angrenzenden Räumen Q_{NZ} . Die dazu erforderlichen Tagesmittelwerte der Strahlungswärmestromdichte q_{Sol} und der Transmissionswärmestromdichte q_{Tra} werden in Abhängigkeit der Bauteileigenschaften (z.B. U-Wert, Verschattungsgrad, Ausrichtung)

¹Das zu erlangende Wärmeschutzniveau, die Wärmeschutzklasse (WSK A bis D), ergibt sich aus den Raumklimaanforderungen und der Gebietszuordnung. Die Klasse mit den höchsten Anforderungen, WSK A, ist klimatisierten Gebäuden vorbehalten. Für Bauten des Gesundheitswesens wird Wärmeschutzklasse B empfohlen. Für die übrigen Nutzungen ist teilweise eine geringere Wärmeschutzklasse erforderlich wenn das Gebäude im Klimagebiet 2 errichtet wird.

Tabellen entnommen und mit den jeweiligen Flächen (Fensterflächen A_{Win} , Außenbauteilflächen $A_{Env,e}$) multipliziert. Wärmeströme zu angrenzenden Zonen werden bei Temperaturdifferenzen $\Delta\Theta_{Z-NZ}$ über 2 K veranschlagt. Der Betrag ergibt sich aus dem Wärmedurchgangswiderstand $R_{Env,NZ}$ der jeweiligen Bauteile sowie deren Fläche A_{NZ} . [Petzold, 1983] [TGL 35424-4, 1981]

$$\begin{aligned}
 q_{Zone,e} &= \frac{Q_{Tra} + Q_{Sol} + Q_{NZ}}{A_{Base}} \left[\frac{W}{m^2} \right] \\
 &= \frac{\sum_{i=1}^n (q_{Tra} \cdot A_{Env})_i + \sum_{i=1}^n (q_{Sol} \cdot A_{Win})_i + \sum_{i=1}^n \left(\frac{A_{NZ} \cdot \Delta\Theta_{NZ}}{R_{E,NZ}} \right)_i}{A_{Base}} \quad (3.3)
 \end{aligned}$$

Das von Petzold aufgestellte Verfahren behandelt auch Nutzbauten, z.B. Landwirtschaftsbauten, in denen sehr hohe innere Wärmelasten auftreten können. In diesem Fall wird der aus der Speicherfähigkeit ermittelte Grenzwert für die äußere Wärmelast durch einen Grenzwert ersetzt, der sich aus der inneren Wärmelast ergibt.

Neben dem Nachweis der äußeren Wärmelast muss der Nachweis der inneren Wärmelast geführt werden. Dieser muss über die Lüftung wieder abgeführt werden. Sind im zu bemessenden Raum lediglich Personen, Apparate und Leuchtmittel vorhanden, so werden die inneren Lasten gemäß nachfolgender Gleichung berechnet. Darin werden Personen mit einer Wärmeabgabe Q_{Per} (Tabellenwerte), einer anteiligen Aufenthaltsdauer $f_{t,Per}$, Apparate mit einer Nennleistung Q_{Equ} (Herstellerangabe) und einer Betriebszeit von $f_{t,Equ}$, Leuchtmittel mit einer raumabhängigen Zielbeleuchtungsstärke E_{Zone} und einer darauf bezogenen Wärmelast q_{Light} (Tabellenwert) veranschlagt. Für Produktionsbauten mit zusätzlichen Wärmelasten durch Tiere oder Maschinen ist die erweiterte Form der Gleichung anzuwenden (siehe [TGL 35424-4, 1981, Gleichung 7]. [Petzold, 1983]

$$q_{Zone,i} = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Per} \cdot f_{t,Per})_i + \sum_{i=1}^n (Q_{Equ} \cdot f_{t,Equ})_i + \sum_{i=1}^n (Q_{Light})_i}{A_{Base}} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (3.4)$$

Die zulässige innere Wärmelast wird aus der vorhandenen Lüftungsfläche sowie den je nach Lüftungstyp abführbaren Wärmeströmen ermittelt. Letztere werden unter Berücksichtigung der Bebauungssituation, der Fensterkonstruktion und des Lüftungsprinzips (Querlüftung, einseitige Lüftung etc.) Tabellen entnommen.

3. Verfahren zur Bemessung des Sommerlichen Wärmeschutzes

3.2.2. Verfahren nach Rouvel und Kolmetz

Das Verfahren von Rouvel und Kolmetz basiert auf der Annahme, dass ein direkter Zusammenhang zwischen den für die Jahres- Heizwärmebilanz nicht nutzbaren Wärmeströmen $(1 - \eta_{Gain}) \cdot Q_{Gain}$ und der Sommerlichen Überhitzung, d.h. der Übertemperaturgradstunden DH_{Zone} , existiert. Unter dem Kennwert DH_{Zone} ist die Jahressumme der Produkte aus Überhitzungszeit (Stunden) einer gewählten Grenztemperatur und Überhitzungsbetrag (Kelvin) gemeint. [Rouvel u. Kolmetz, 1997]

$$DH_{Zone}(Q_{Occ}, Q_{Sol}, H_{Vent}, H_{Tra}, C_{Zone}) < DH_{\theta_{max}} \quad [Kh] \quad (3.5)$$

Die Nachweisführung basiert auf den Berechnungsdaten des Monatsbilanzverfahrens der Heizwärmebedarfsberechnung gemäß DIN 4108-6. Für diese Berechnung wird das Verhältnis der nicht nutzbaren Wärmegewinne aus inneren Wärmequellen Q_{Occ} und solaren Wärmeeinträgen Q_{Sol} zur Summe der Wärmeverlustkoeffizienten durch Transmission H_{Tra} und Lüftung H_{Vent} gebildet und über alle Monate aufsummiert. [Rouvel u. Kolmetz, 1997], [Kolmetz, 1996], [Rouvel u. a., 2001]

$$\begin{aligned} DH_{Zone} &= \sum_{i=1}^{12} ((1 - \eta_{Gain}) \cdot \frac{Q_{Gain}}{H_{Loss}})_i & [Kh] & (3.6) \\ &= \sum_{i=1}^{12} ((1 - \eta_{Gain}) \cdot \frac{\sum_{j=1}^n (q_{Sol,i} \cdot A_{Win} \cdot f_{Fra} \cdot f_{Sha} \cdot g_{Gla})_j}{\sum_{j=1}^n (U_{Env} \cdot A_{Env})_j + (c_{Air} \cdot \rho_{Air} \cdot \dot{V}_{Zone})})_i \end{aligned}$$

Die Gewinne werden mit einem Nutzungsgrad η_{Gain} multipliziert, welcher das Gewinn-Verlust- Verhältnis $\gamma_{Zone} = \frac{Q_{Gain}}{Q_{Loss}}$ und die Speicherfähigkeit der Konstruktion C_{Zone} berücksichtigt und über einen Zeitfaktor a berechnet wird. Die nachfolgende Gleichung bezieht sich auf einen monatlichen γ_{Zone} - Wert ungleich Eins. [Rouvel u. a., 2001]

$$\eta_{Gain} = \frac{1 - \gamma_{Zone}^a}{1 - \gamma_{Gain}^{(a+1)}} \quad [-] \quad (3.7)$$

$$a = 1 + \frac{\tau_i}{\tau_0} = 1 + \frac{C_{Wirk}}{H_{Loss}} \quad [-] \quad (3.8)$$

Die Berechnung wurde im Vergleich zur Heizwärmebilanzrechnung in einigen Punkten korrigiert. So wird beispielsweise ein monatlich differenzierter Luftwechsel und Sonnenschutz- Verschattungsgrad (Richtungsabhängigkeit) angesetzt. Zudem muss die effektive Speicherkapazität der Bauteile aufwändiger bestimmt werden. [Rouvel u. a., 2001]

Als Grenzwerte für die zulässige Gradstundenzahl $DH_{\theta_{max}}$ werden von den Autoren je nach Klimaregion 8000, 11000 oder 14000 Kh empfohlen. Diese Werte entsprechen in den durchgeführten Simulationsstudien Überschreitungshäufigkeiten $OT_{theta_{max}}$ der standortabhängig anzunehmenden Maximaltemperaturen $\theta_{max} = 25 - 27^{\circ}C^2$ von unter 10%. [Rouvel u. a., 2001, Tab. 3.1, S. 33]

3.2.3. Verfahren nach Hauser und Otto

Das Verfahren von Hauser und Otto basiert, ebenso wie das Verfahren nach Rouvel und Kolmetz, auf der Annahme, dass ein direkter Zusammenhang zwischen den nicht nutzbaren Wärmegewinnen der Jahres- Heizwärmebedarfsberechnung und dem Überhitzungsrisiko eines Bauwerks besteht. Als Grenzwert schlagen die Autoren ebenfalls die Übertemperaturgradstunden $OH_{\theta_{max}}$ eines Jahres vor. In Anlehnung an die damals gültige Arbeitsstättenverordnung des Bundes beträgt die Grenztemperatur $\theta_{max} = 26^{\circ}C$. [Otto u. Hauser, 1998]

$$DH_{Zone}(Q_{Occ}, Q_{Sol}, H_{Vent}, H_{Tra}, C_{Zone}) < DH_{max} \quad [Kh] \quad (3.9)$$

Der Zusammenhang zwischen den auftretenden Übertemperaturgradstunden und den nicht- nutzbaren Wärmegewinnen wird über eine statistische Analyse von Simulationsrechnungen hergestellt. Diese Rechnungen wurden mit einem für Deutschland charakteristischen Klimadatensatz³ durchgeführt. Als Simulationsbeispiele dienen ein Wohn- und ein Bürogebäude mit jeweils drei unterschiedlichen Konstruktions- bzw. Speicherfähigkeitsklassen. Es werden sowohl Nutzungsprofile der inneren Wärmequellen als auch der Sonnenschutzsteuerung und des Lüftungsverhaltens berücksichtigt. [Otto u. Hauser, 1998] Die Nachweisführung orientiert sich ebenfalls an der

²Die Maximaltemperaturen betragen für die sommerkühle Klimazone $25^{\circ}C$, für die gemäßigte $26^{\circ}C$ und für die sommerheiße Klimazone $27^{\circ}C$. [Rouvel u. a., 2001, S.19]

³Es handelt sich dabei um das Testreferenzjahr des Deutschen Wetterdienstes für Zone 13 aus dem Jahr 2004.[Otto u. Hauser, 1998]

3. Verfahren zur Bemessung des Sommerlichen Wärmeschutzes

DIN 4108-6. Es werden die monatlichen Wärmegewinne und Wärmeverluste für den zu bemessenden Raum berechnet und daraus das monatliche Gewinn- Verlust- Verhältnis ermittelt. Die Gleichungen der zu Grunde liegenden Norm wurden mit einem Korrekturfaktor für die Lüftung f_{Vent} , einem Korrekturfaktor für den Strahlungseintrag (Einfallswinkelkorrektur f_{SolInc} und eine Himmelsrichtungskorrektur f_{Dir}), einem Korrekturfaktor für die Sonnenschutzsteuerung f_{ShOp} , einem Korrekturfaktor für die zeitliche Überlagerung von inneren Lasten und Strahlungslasten f_{Gain} und einem Korrekturfaktor für das Wärmeschutzniveau f_{Tra} ergänzt. Die korrigierten Gleichungen sind nachfolgend aufgeführt.

$$\begin{aligned}
 DH_{Zone} &= a \cdot (\gamma_{Zone})^b = a \cdot \left(\frac{Q_{Gain}}{Q_{Loss}} \right)^b & [Kh] \\
 &= a \cdot \left(\frac{(Q_{Sol,op} + Q_{Sol} + Q_{Occ})}{(Q_{Tra} + Q_{Vent})} \right)^b & (3.10)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{Gain} &= f_{Gain} \cdot \left(\sum_{j=1}^n (f_{SolInc} \cdot f_{Dir} \cdot q_{Sol} \cdot A_{Win} \cdot f_{ShaOp} \cdot f_{Sha} \cdot f_{Fra} \cdot g_{Gla})_j \right. \\
 &+ \sum_{j=1}^n (q_{sol} \cdot A_{Env} \cdot R_{Env,se} \cdot U_{Env} \cdot \alpha_{Env,se})_j \\
 &+ \left. Q_{Peo} + Q_{Lig} + Q_{Equ} \right) & [W] \quad (3.11)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{Loss} &= f_{Tra} \cdot \left(\sum_{j=1}^n (U_{Env} \cdot A_{Env}) + \Delta H_{Bri} \right)_j \cdot \Delta \Theta_{e-i} \\
 &+ f_{Vent} \cdot c_{Air} \cdot \rho_{Air} \cdot \dot{V}_{Zone} \cdot \Delta \Theta_{e-i} & [W] \quad (3.12)
 \end{aligned}$$

Die Korrekturfaktoren wurden an Hand eines Wohnraumes ermittelt. Sie werden aus Tabellen in Abhängigkeit des Gebäudetyps ausgewählt. [Otto u. Hauser, 1998, Tab. 5-2 und Tab. 5-3] Die Auswahl der Faktoren a und b erfolgt ebenfalls aus Tabellen in Abhängigkeit der Speicherfähigkeit der Konstruktion, der Art des Raumes, des Lüftungsschemas und des Gebäudetyps. [Otto u. Hauser, 1998, Tab. 5-4]

3.2.4. Verfahren nach Hauser & Gertis

Das durch Hauser und Otto als Normungsvorschlag erarbeitete Verfahren basiert auf analytischen Ansätzen zum eingeschwungenen Zustand des Bauwerks, d.h. dem thermischen Verhalten der Konstruktion welches aus einem tageszyklischen Lasteintrag resultiert. Die Anforderung an die Baukonstruktion besteht darin, dass die Raumlufttemperatur unter Randbedingungen eines typischen Sommertages (Außenlufttemperatur, Strahlungseintrag) einen Wert von 32°C nicht übersteigt. [Hauser u. Gertis, 1980]

Zur Erarbeitung des vereinfachten Ansatzes wurden Berechnungsergebnisse für ein beispielhaftes Gebäude (Bürogebäude) und deren Abhängigkeiten zu den beeinflussenden Eingangsdaten analysiert. Als maßgebende Faktoren werden Fensterfläche, Sonnenschutz, Lüftung, Wärmespeicherkapazität und Orientierung benannt. Der Ansatz des Verfahrens besteht darin, diese Eigenschaften in Kennwerte zu überführen. Die Verfahrensanforderung besteht darin, Summen dieser Teilkennwerte, den vorhandenen und den zulässigen Sonneneintragskennwert (S_{Zone} und $S_{Zone,max}$) aufeinander abzustimmen. [Hauser u. Gertis, 1980]

$$S_{Zone}\left(\frac{A_{Win}}{A_{Env}}, f_{Sha}, g_{Gla}, Dir_{Win}\right) < S_{Zone,max}(C_{Zone}, \dot{V}_{Zone}) \quad (3.13)$$

Der vorhandene Sonneneintragskennwert ist das Produkt aus Fensterflächenanteil, Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung g_{Gla} und mittlerem Verschattungsgrad f_{Sha} . Dieser wird dem zulässigen Sonneneintragskennwert, dem Produkt aus Lüftungsfaktor f_{Ven} und Speicherkapazitätsfaktor f_{Sto} , gegenübergestellt. Sämtliche Faktoren werden als Tabellenwerte bereitgestellt. [Hauser u. Gertis, 1980]

$$\begin{aligned} S_{Zone} &= \frac{A_{Win}}{A_{Env}} \cdot g_{Gla} \cdot f_{Sha} & [-] \\ S_{Zone,max} &= f_{Sto} \cdot f_{Ven} & [-] \end{aligned} \quad (3.14)$$

In der durch Rouvel u. a. überarbeiteten Form des Verfahrens werden die zulässigen und vorhandenen Berechnungswerte mit Hilfe umfangreicher Simulationsstudien stärker aufgeschlüsselt. [Rouvel u. a., 2001]

Die zu Grunde liegenden Simulationsstudien beziehen sich auf ein frei stehendes Einfamilienhaus. Zur Auswertung der Berechnungsergebnisse wird nicht mehr die

3. Verfahren zur Bemessung des Sommerlichen Wärmeschutzes

maximale Raumlufttemperatur für einen typischen Sommertag, sondern die Über-
temperaturgradstunden- bzw. Kelvinstundenzahl eines Jahres $DH_{Zone,max}$ begrenzt.
[Rouvel u. a., 2001] [Hauser u. Otto, 2000] [Hauser, 2000]

Die Nachweisführung erfolgt analog zur vorherigen Verfahrensversion über den zuläs-
sigen und den vorhandenen Sonneneintragskennwert. In der nachfolgenden Gleichung
enthält f_{Win} explizit die Faktoren Verschattungsgrad des Sonnenschutzes f_{Sha} und
Gesamtenergiedurchlassgrad g_{Gla} sowie implizit den Rahmenanteil ($f_{Fra} = 0,7$). Der
Grenzwert $S_{Zone,max}$ ermittelt sich aus den Faktoren für die Standortregion f_{Loc} ⁴,
die Bauart f_{Sto} , die Lüftung f_{Ven} , die Fensterneigung f_{Slo} und die Fensterorientie-
rung $f_{Dir,Win}$. [Hauser u. Otto, 2000], [DIN 4108-2(2003)], [DIN 4108-2(2013)]

$$\begin{aligned} S_{Zone} &= f_{Loc} + f_{Sto} + f_{Ven} + f_{Slo} + f_{Dir,Win} & [-] \\ S_{Zone,max} &= \frac{\sum_{j=1}^n (A_{Win} \cdot f_{Win})_j}{A_{Base}} & [-] \end{aligned} \quad (3.15)$$

3.2.5. Verfahren nach Häupl

Der Ansatz von Häupl geht auf die Überlegungen von Petzold über den Einschwing-
vorgang der Raumlufttemperatur zurück. [Petzold, 1983, Kap. 5] In diesem An-
satz wird davon ausgegangen, dass die Reaktion des Bauwerks auf eine sommerliche
Schönwetterperiode als plötzlich einsetzender Lasteintrag modelliert werden kann.
Raumluft und Konstruktion weisen eine Ausgangstemperatur auf, welche sich in Fol-
ge der schlagartig einsetzenden kurzweiligen Strahlung, der schlagartig zunehmenden
Außenlufttemperatur sowie der inneren Wärmelasten erhöhen. Solange ein Tempe-
raturgefälle zwischen der Raumluft und der Hüllkonstruktion besteht, existiert ein
Wärmestrom in Richtung Bauwerksmassen. [Häupl, 1996], [Petzold, 1983]

Aus der Bilanzgleichung wird eine Differentialgleichung für die zeitabhängige Verän-
derung der Raumlufttemperatur formuliert. Deren Lösung, d.h. die Raumlufttem-
peratur zu einem Zeitpunkt, wird aus der Lufttemperatur nach unendlich langer
Aufheizzeit θ_{∞} und der Einstellzeit τ ermittelt. [Häupl, 1996]

⁴Die Einteilung des Bundesgebietes umfasst drei Zonen, Klimaregionen A (sommerkühl) bis C
(sommerheiß). Diese Einteilung basiert auf einer Analyse der Testreferenzjahre 2004 des DWD.
Dieser Faktor enthält in der Neufassung die Angaben zu den beiden folgenden Faktoren, dem
Lüftungsschema und dem Bauwerkstyp (Wohn- oder Nichtwohngebäude und dessen Speicherfä-
higkeit). [DIN 4108-2(2013)]

In der Nachweisführung empfiehlt Häupl eine Begrenzung der mittleren Raumlufttemperatur nach definierter Aufheizzeit. In Anlehnung an die Dauer mitteleuropäischer Schönwetterphasen empfiehlt Häupl eine Aufheizzeit von fünf Tagen. Zum Ende dieser Belastungsphase sollte die mittlere Tagestemperatur höchstens 26°C betragen. Zum Nachweis dieses Wertes werden in einem ersten Schritt die Wärmeströme aus Transmission H_{Tra} (Transmissionskoeffizient in $\frac{\text{W}}{\text{K}}$), aus kurzweiliger Einstrahlung Q_{Sol} , aus Lüftung H_{Ven} (Verlustkoeffizient Lüftung in $\frac{\text{W}}{\text{K}}$) und aus inneren Lasten Q_{Occ} sowie die Wärmespeicherkapazität C_{Zone} ermittelt. [Häupl, 2008], [Häupl, 1996], [Petzold, 1983]

$$\tau = 3 \cdot \left[\frac{C_{Wirk}}{H_{Tra} + H_{Ven}} \right] \quad [\text{sec}] \quad (3.16)$$

$$\theta_{i,\infty} = \theta_{e,m} + \frac{Q_{Sol} + Q_{Occ}}{H_{Tra} + H_{Vent}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.17)$$

$$\Delta\theta_i(t) = \theta_{i,\infty} + \left[\theta_{Env,i} - \left[\theta_{e,m} + \frac{Q_{Sol} + Q_{Occ}}{H_{Tra} + H_{Vent}} \right] \right] \cdot e^{-\frac{H_{Tra} + H_{Ven}}{C_{Zone}} \cdot t} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.18)$$

In der erweiterten Form geht die Verzögerung des Aufheizvorgangs durch den inneren Wärmeübergangskoeffizienten α_i in die Ermittlung der Einstellzeit ein und es werden jeweils Strahlungs- und Lüftungswärmegewinne aufgeteilt. Zu den Strahlungsgewinnen sind neben jenen über transparente Bauteile auch jene über die opaken Bauteile anzusetzen. Der Lüftungskoeffizient kann in einen Nacht- und Tageswert aufgeteilt werden. Zudem ist der mittlere Lüftungswärmestrom als Entlastungsterm der Strahlungsgewinne und nutzungsbedingten Gewinne zu ergänzen. [Häupl, 2008], [Häupl, 1996]

3. Verfahren zur Bemessung des Sommerlichen Wärmeschutzes

3.2.6. Verfahrensübersicht

Die Auswahl der berücksichtigten Wärmeströme ist in allen verglichenen Verfahren identisch. Unterschiedlich ist hingegen die Form der Eingangsdatenberücksichtigung. Da die Verfahren mehrheitlich als Ingenieursverfahren ausgelegt sind, wird ein Großteil der Eingangskennwerte vereinfacht und zusammengefasst sowie in Form von Tabellenkennwerten dargeboten. Das erleichtert zwar den Datenerhebungsaufwand, schränkt jedoch, wenn es sich um nicht-physikalische Eingangsgrößen wie z.B. statistisch ermittelte Koeffizienten handelt, die Flexibilität der Verfahren stark ein. Bis auf das Modell von Häupl greifen alle Ansätze auf diese Art von Eingangsdaten zurück.

Ein weiteres wesentliches Unterscheidungsmerkmal der Verfahren ist das Nachweisprinzip (Nachweisansatz), welches stark mit der betrachteten Nachweisperiode und den Nachweisanforderungen (Zonenbedingung und Grenzwert) zusammenhängt.

Eine Gegenüberstellung dieser Verfahrenscharakteristiken enthält Tabelle 3.1.

Tabelle 3.1.: Vergleich der Rahmenbedingungen für ausgewählte Verfahren zur Vorbemessung des Sommerlichen Wärmeschutzes

	Petzold	Kolmetz & Rouvel	Hauser & Otto	Hauser & Gertis	Häupl
Zonenbedingung	$\theta_{i,m} < \theta_{max}$	$DH_{24-30^{\circ}C} < DH_{max}$	$DH_{26^{\circ}C} < DH_{max}$	$\theta_i < \theta_{max}$ $OH_{26^{\circ}C} < 10\%$	$\theta_{i,5d} < \theta_{max}$
Begrenzter Wert	θ_{max}	DH_{max}	DH_{max}	θ_{max} OH_{max}	θ_{max}
Grenzwert	$25 - 27^{\circ}C$	8000-14000 Kh	8000-14000 Kh	$32^{\circ}C$ 10 %	$26^{\circ}C$
Nachweisprinzip	$q_{Zone} < q_{Zone,max}$	$DH_{Zone} < DH_{max}$	$DH_{Zone} < DH_{max}$	$S_{Zone} < S_{Zone,max}$	$\theta_{i,5d} < \theta_{max}$
Nachweisperiode	typischer Sommertag	Monat(e)	Monat(e)	Sommerphase	Sommerphase (5d)

3.3. Simulationsverfahren

Neben den vereinfachten Vorbemessungsverfahren stehen dem Planer Softwaretools zur Gebäudesimulation zur Verfügung. Die Simulation verfolgt ein anderes Prinzip der Gebäudebewertung als ein Bemessungsverfahren. Die Berechnungsmethoden sind auf Grund der implementierten umfassenden physikalischen Zusammenhänge dazu geeignet, den realen Fall möglichst genau nachzuvollziehen. Sicherheitszuschläge im Nachweisansatz sind daher für die Gebäudesimulation nicht erforderlich, können aber in die Randbedingungen, d.h. in die Auswahl ungünstiger Nutzungs- und Klimarandbedingungen einfließen.

Es existiert gegenwärtig eine Vielzahl von Simulationsmodellen wie z.B. TRNSYS, ESP-r, EnergyPlus, DOE-2 und BLAST. Diese unterscheiden sich vornehmlich in der Art und Anzahl der implementierten physikalischen Modelle sowie in der Art der numerischen Lösungsansätze. Einen weiteren Aspekt stellt die Anwenderfreundlichkeit der Tools dar. Dazu sind die Erstellung des Gebäudemodells sowie die Auswertung der Berechnungsergebnisse zu zählen.

3.3.1. Simulationssoftware Energy Plus für die Sommerfallbewertung

Energy Plus ist ein Simulationstool welches im Auftrag der US-amerikanischen Energiebehörde (US Department of Energy: DOE) aus der Zusammenlegung zweier Simulationstools, DOE-2 und BLAST, entstanden ist. Die Software wurde 2001 veröffentlicht und wird seither stetig weiterentwickelt. Sie enthält unter anderem Berechnungsmodelle zur Abbildung von Heizungsanlagen, Kühlanlagen, Lüftungsanlagen, Freier Lüftung und Warmwasserverbräuchen. Energy Plus ist ein Rechenkern. Die Eingabe der Simulationsmodelle muss über Texteditoren oder Aufsatzprogramme von Drittanbietern erfolgen. Gleiches gilt für die Ergebnisauswertung. [Wetter, 2013]

Für die Sommerfallbewertung ist Energy Plus gut geeignet, da verschiedene Module zur Detaillierung der Strahlungsberechnungen enthalten sind. Diese Module sind das Himmelsmodul, das Verschattungsmodul, das Tageslichtmodul und das Fenstermodul (siehe Abb. 3.2). Zur Abbildung des thermischen Speicherverhaltens sowie der Oberflächentemperaturen stehen ebenfalls mehrere Module zur Verfügung. All diese Module sind an den Wärmebilanzmanager der Bauteiloberflächen angekoppelt und ersetzen damit optional die Standardmodelle. Ähnlich verhält es sich mit dem

3. Verfahren zur Bemessung des Sommerlichen Wärmeschutzes

Gebäudeanlagenmanager. Hier können ebenfalls Zusatzmodule gewählt werden, beispielsweise für die Modellierung von Photovoltaik- Elementen. [Wetter, 2013, S.6 ff]

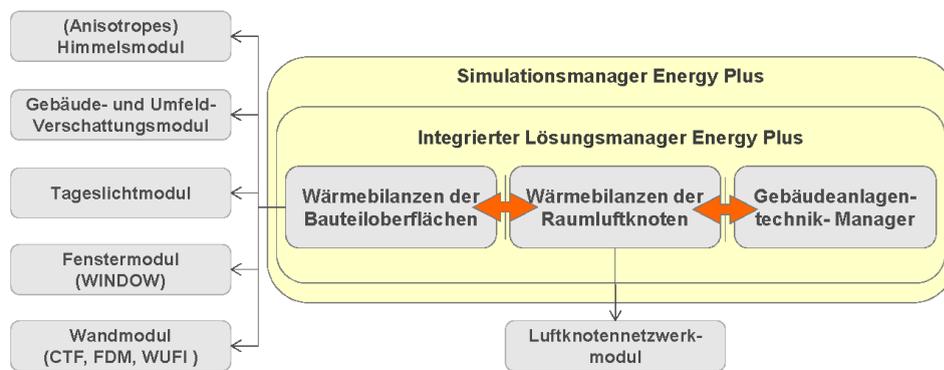


Abbildung 3.2.: Übersicht der modularen Struktur von Energy Plus. Linksseitig sind die an die Oberflächenwärmebilanz angekoppelten Module dargestellt. Darüber hinaus sind verschiedene Module der Gebäudetechnik verknüpfbar. Die Abbildung wurde sinngemäß aus [Wetter, 2013, S.6] übernommen.

Ein großer Vorteil des Simulationstools Energy Plus ist darin zu sehen, dass es sich um ein geometrisches Simulationsmodell handelt, d.h sämtliche Bauteile werden über die Koordinaten der Flächeneckpunkte angegeben. Das ermöglicht detaillierte Strahlungsberechnungen, z.B. zur Berücksichtigung von Eigenverschattung durch Gebäudeteile, verschattenden Umgebungsobjekten (z.B. Gebäude, Bäume) oder Tageslichtverhältnissen. [Wetter, 2013, S.139 ff]

Das Himmelsmodul stellt ein anisotropes Himmelsmodell dar. Im nicht-geometrischen Standardfall werden die aus den Wetterdaten verfügbaren Diffusstrahlungswärmeströme in Abhängigkeit des Konstruktionsstandwinkels auf die jeweilige Fläche aufgeschlagen. Dabei spielt die Ausrichtung der Fläche keine Rolle. Im anisotropen Himmelsmodell von Energy Plus wird hingegen angenommen, dass aus dem Horizontbereich und aus der Sonneneinfallrichtung des Himmelsgewölbes erhöhte Diffusstrahlungseinträge auf eine Fläche treffen. [Wetter, 2013, S.139 ff]

Das Verschattungsmodul berechnet die Reduktion der Direktstrahlung als Folge von Eigenverschattung, z.B. durch Gebäudeflügel oder Überhänge, sowie Verschattung durch benachbarte Gebäude. Neben dieser Verschattungswirkung kann Energy Plus optional die Reflexionswirkung von Bauteilen berechnen. In diesem Fall wird die

diffuse Reflexion der Direktstrahlung durch den Untergrund und durch umgebende Bauteile über ein Strahlenverfolgungsmodell ermittelt. [Wetter, 2013, S. 144 ff]

Das Tageslichtmodul ermöglicht die vereinfachte Berechnung der Tageslichtverhältnisse in einer Zone im Verlauf eines Jahres. Dieser Berechnung liegt der Klimadaten-satz zugrunde. Für die Erstellung von detaillierten Berechnungen, d.h. Tageslicht-karten, werden Standardbedingungen verwendet. Diese Berechnungen berücksichti-gen Umgebungsobjekte (Verschattungsmodul), Gebäudeelemente (z.B. Überhänge, Sonnenschutz, Glaseigenschaften) sowie Zoneneigenschaften (Zonengeometrie und Oberflächeneigenschaften). Die Berechnungsergebnisse können z.B. in Form der Ta-geslichtquotienten zur Bewertung der Tageslichtversorgung oder z.B. in Form von Grenz- Blendindizes für die Sonnenschutzsteuerung oder in Form von Grenzwerten der Beleuchtungsstärke für die Beleuchtungssteuerung, als Regelungskennwerte eingehen. [Wetter, 2013, S.173 ff]

Zur Berechnung des Wärmestroms durch die Fensterkonstruktion wird für jeden Zeitschritt und für jede Ebene die Oberflächentemperatur aus den detaillierten Wär-mebilanzgleichungen berechnet. Diese beinhalten den absorbierten Anteil der ein-treffenden Solarstrahlung sowie den über Konvektion, langwellige Abstrahlung und Konduktion mit der benachbarten Ebene bzw. mit der angrenzenden Raum- oder Außenluft ausgetauschten Wärmestrom. [Wetter, 2013, S. 263 ff]

3.3.2. Anwendung von Simulationsrechnungen für die Sommerfallbewertung

Die Exaktheit der Simulationsrechnungen kann gegenwärtig für die Sommerfallbe-messung nicht ausgeschöpft werden. Das geht auf zwei Hauptursachen zurück, die Simulationsrandbedingungen und die Auswertungsansätze. Zu diesen Randbedin-gungen gehören die klimatischen Randbedingungen und die Nutzungsbedingungen. Das Problem fehlender Szenarien für die sommerlichen Klimarandbedingungen wur-den mit der Herausgabe der Sommer- Testreferenzjahre weitestgehend gelöst. [Wet-terdienst, 2011]. Ein weitaus größeres Problem stellen die Nutzungsszenarien dar. Werteempfehlungen sind hierfür auch nur für ausgewählte Gebäudetypen und Stand-orte zu erwarten da eine große Wechselwirkung zwischen dem Nutzerverhalten, den Nutzereigenschaften, dem Standortklima und den baulichen Gegebenheiten anzu-nehmen ist. Eine ähnliche Situation ist für die Auswertung der Simulationsergebnisse zu verzeichnen. So gibt es zwar eine Vielzahl von Ansätzen und Modellen. Deren

3. Verfahren zur Bemessung des Sommerlichen Wärmeschutzes

Anwendung ist jedoch von den Nutzereigenschaften, den klimatischen Bedingungen und den baulichen Gegebenheiten abhängig.

Die einzige deutsche Norm zur Bewertung des Sommerlichen Wärmeschutzes, DIN 4108-02(2013), gibt zwar Klimadatensätze und Nutzungsbedingungen vor. Diese klammern jedoch wesentliche Probleme der Sommerfallbemessung aus. So ignoriert die Norm die im Jahr 2011 herausgegebene Differenzierung der Klimarandbedingungen in 14 Testreferenzjahre für den Sommerfall einschließlich Stadtklimaanpassung ([Wetterdienst, 2011]) und beharrt auf der vormaligen Einteilung der Bundesrepublik in drei Sommerklimazonen. Darüber hinaus werden nicht belegte Nutzungsrandbedingungen, z.B. eine konstante Luftwechselrate⁵ von $0,5 \frac{1}{h}$ für Wohnbauten, vorgegeben. Für die Sonnenschutzsteuerung wird ein Regelungsgrenzwert⁶ empfohlen, welcher in unseren Breitengraden bereits während des Frühjahrs allein durch den Diffusstrahlungseintrag erreicht wird und daher unrealistisch niedrig erscheint. Ebenso werden für die Auswertung der Simulationsrechnungen unzureichend dokumentierte Grenzwerte aufgeführt⁷. Auch hier bleibt der aktuelle Stand der Forschung bzw. der Normung unbeachtet. So enthält ISO 15251 (2007) bereits einen einfachen Berechnungsansatz für den zulässigen Temperaturbereich und erlaubt gleichzeitig die Unterscheidung von Nutzungskategorien und die Differenzierung standortabhängiger Anforderungen. [DIN 4108-2, 2013], [DIN 4108-2, 2003], [DIN EN 15251, 2012]

⁵Diese Luftwechselrate ist nicht zwingend konstant. Sie kann, z.B. wenn während des Tages die Raumlufttemperatur über die Außenlufttemperatur steigt, auf bis zu $3,0 \frac{1}{h}$ angehoben werden. Es sind für diese Annahme keine Bedingungen, z.B. in Form baulicher Voraussetzungen wie Querlüftungsmöglichkeiten, angegeben. [DIN 4108-2, 2013, S. 29 ff.]

⁶Der Sonnenschutz wird ab einer Einstrahlungsleistungsdichte von 150 (Nichtwohngebäude) bis 300 (Wohngebäude) $\frac{W}{m^2}$ aktiviert, d.h. hinab gelassen. [DIN 4108-2, 2013, Abs. j, S. 31]

⁷Die Grenzwerte werden in Form von Gradstundenzahlen einer standortabhängigen Grenztemperatur von $25 - 27^\circ C$ angegeben. Sie betragen 500 Kh für Nichtwohngebäude und 1200 Kh für Wohngebäude. [DIN 4108-2, 2013, Tab. 9, S. 28]

4. Kritische Bewertung der Handrechenverfahren und des Simulationsverfahrens

Zur Einschätzung der gegenwärtigen Bemessungsverfahren ist es erforderlich, die Ergebnisse der Rechnung für beispielhafte Räume zu vergleichen und realen Messdaten gegenüber zu stellen. Da die Verfahrensausgabedaten sehr unterschiedlich sind, kann diese Einschätzung für die Handrechenverfahren nur qualitativ erfolgen. Für die Simulationsverfahren soll sie zudem quantitativ durchgeführt werden da hier Mess- und Simulationsergebnis in Form der Stundenmittelwerte der Raumlufttemperatur oder der operativen Temperatur direkt gegenüber gestellt werden können.

Im folgenden Abschnitt werden die Handrechenverfahren von Hauser & Gertis, von Otto & Hauser, von Petzold und von Häupl sowie das mit Energy Plus (Vers. 7) aufgesetzte Simulationsmodell inhaltlich sowie in Bezug auf die Aussagefähigkeit am Beispiel von etwa 30 messtechnisch erfassten Räumen des Universitätsklinikums Dresden bewertet.

4.1. Untersuchte Zonen des Universitätsklinikums Dresden

Der Vergleich der Verfahren wird am Beispiel von etwa dreißig Räumen in drei Gebäuden des Universitätsklinikums Dresden vorgenommen. Diese sind die Kinder- und Frauenklinik (Haus 21), die Notaufnahme (Haus 58) und das Operative Zentrum (Haus 59).



Abbildung 4.1.: Fassadenansichten der Gebäude des Universitätsklinikums Carl Gustav Carus Dresden, in denen Raumklimamessungen durchgeführt wurden: Gebäude 21 (Kinder- und Frauenklinik), Gebäude 58 (Notaufnahme, Chirurgie), Gebäude 59 (Chirurgisches Operatives Zentrum).

Gebäude 21 beinhaltet die Abteilungen Kinderchirurgie, Jugendmedizin, Frauenheilkunde und Geburtshilfe und wurde im Zeitraum 1999 bis 2003 errichtet. Der sechsgeschossige Bau weist große Verglasungsflächen auf und ist mit leichten Auskragungen (Balkone der Patientenzimmer) sowie außen liegenden Lamellenjalousien als Sonnenschutzvorrichtungen versehen.

Gebäude 58 ist ein Bestandsbau welcher in den 1970er Jahren errichtet und im Zeitraum 1998 bis 2001 umfassend saniert wurde. Er beherbergt die Notaufnahme mit Operationstrakt sowie Abteilungen der Anästhesiologie und Intensivtherapie. Die Sonnenschutzvorrichtungen der massiven Lochfassade sind außenliegende Jalousien und Rollos.

Gebäude 59 wurde im Zeitraum 1999-2002 neu errichtet und beinhaltet ein Operatives Zentrum sowie die Abteilungen für Neurochirurgie, Viszeral-, Thorax- und Gefäßchirurgie, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie. Der Bau wurde bis auf den Patientenbereich als Stahlbetonskelettbau mit großen Fensterflächen und beweglichem Sonnenschutz (Lamellenjalousien) ausgeführt.

4.2. Ergebnisse der Messreihe Juli bis Dezember 2010

Die Sensoren zur Aufzeichnung des Raumklimas wurden in 35 Räumen verteilt und zeichneten die viertelstündlichen Werte der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte auf. Die Messgenauigkeit der Sensoren beträgt für die Temperatur $\pm 1\text{ K}$ und für die relative Luftfeuchte $\pm 3\%$. 25 Datensätze erwiesen sich als auswertbar, 5 Geräte waren defekt, 2 Messungen wurden durch die Nutzer vorzeitig beendet, drei Datensätze waren nicht auswertbar¹. Eine Übersicht der für die Auswertung relevanten Räume und deren allgemeine Eigenschaften befindet sich im Anhang (Tabelle A.3).

4.2. Ergebnisse der Messreihe Juli bis Dezember 2010

Zur Bewertung der Messreihe wird auf die in Abschnitt 2.2.10 erläuterten Normen und die in Abschnitt 6.2.6 aufgeführten optimalen Temperaturwerte zurückgegriffen. Eine Übersicht über die Messergebnisse der einzelnen Räume enthält Abbildung 4.2, eine Übersicht der Kennwerte aller Räume enthält Tabelle 4.1. Aufgeführt sind darin die mittleren, minimalen und maximalen Raumlufttemperaturen ($\Theta_{I,air,avg}$, $\Theta_{I,air,min}$, $\Theta_{I,air,max}$), die mittleren, minimalen und maximalen Raumluftfeuchten ($\Phi_{I,air,avg}$, $\Phi_{I,air,min}$, $\Phi_{I,air,max}$), die relative Überschreitungszeit einer Raumlufttemperatur von 26°C ($OT_{26^\circ\text{C}}$), die relative Unterschreitungszeit einer Raumluftfeuchte von 30 % sowie die relative Gesamtnutzungszeit in welcher gemäß den Vorgaben der ISO 15251 unkomfortable Raumklimabedingungen² herrschen ($DT_{ISO15251}$).

Werden die Ergebnisse der relativen Zeit unkomfortabler Raumklimabedingungen mit dem von der Norm ISO 15251 für die Langzeitbewertung geforderten Grenzwert von 3 bis 5 % der Nutzungszeit³ verglichen, so ist festzustellen dass diese strenge Anforderung von keinem Raum erfüllt wird. Das ist maßgeblich auf das stetig niedrige Raumluftfeuchteniveau zurückzuführen. Werden lediglich die empfohlenen

¹Diese Messgeräte waren ungünstig angebracht, so dass sie zeitweilig der direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt waren.

²Die geforderten Raumklimabedingungen nach ISO 15251 sind für Gebäudekategorie I eine Raumlufttemperatur zwischen 20 und 26°C sowie eine relative Luftfeuchte zwischen 30 und 50 %.

³Dieser Wert ist laut Norm ISO 15251 auf die Nutzungszeit zu beziehen. Diese ist für die Patienten, da sie sich ganztägig in den Räumen aufhalten, mit dem Messzeitraum identisch. Die Nutzungszeit der übrigen Räume, z.B. Büros, würde kürzer ausfallen. Sie wurde jedoch zu Vergleichszwecken ebenfalls ganztägig angenommen.

4. Kritische Bewertung der Handrechenverfahren und des Simulationsverfahrens

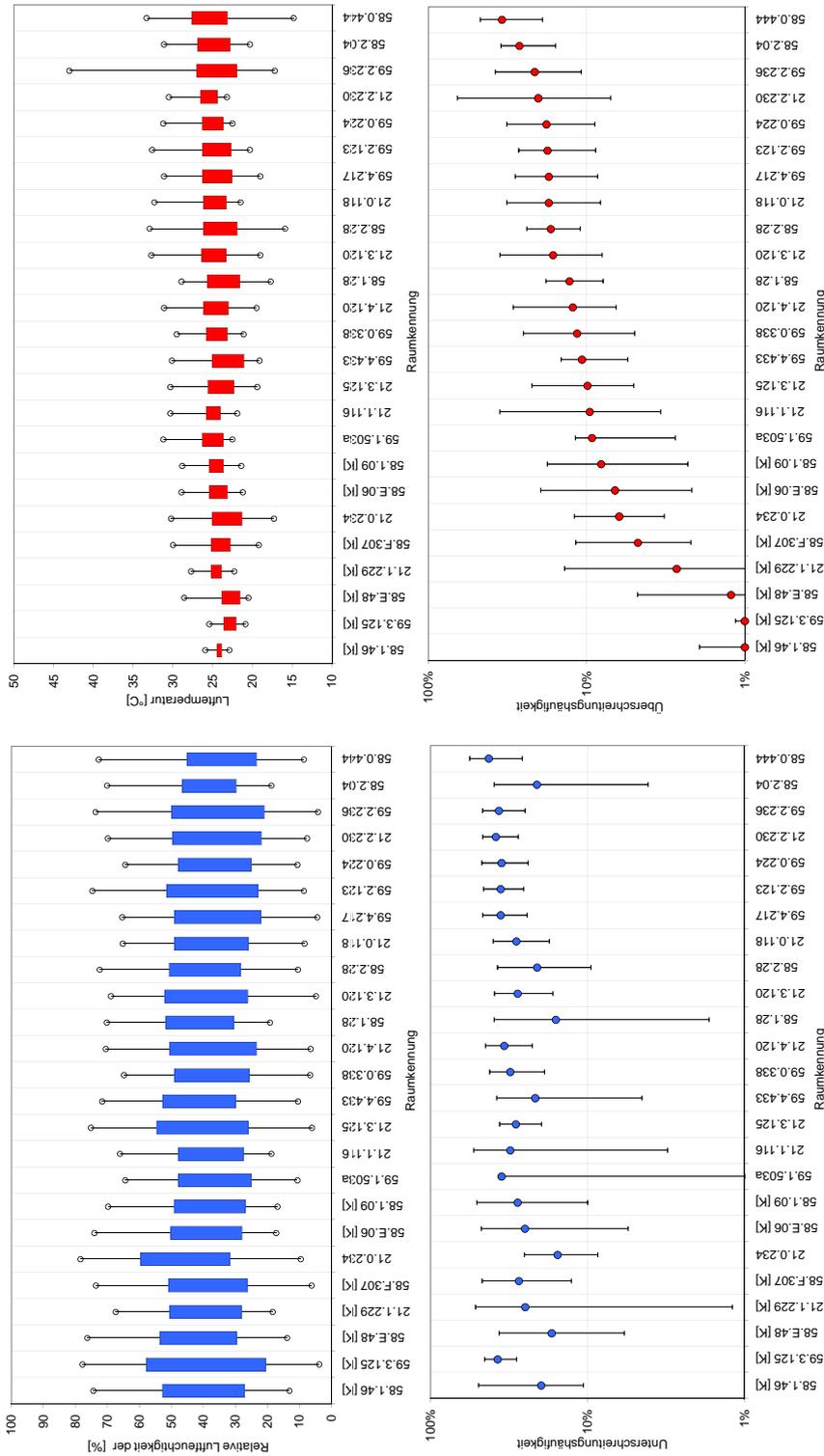


Abbildung 4.2.: Messdatenauswertung der Phase Juli bis Dezember 2010: Kastengrafik-Darstellung (Boxplot) sowie Überschreitungshäufigkeit von 26°C und Unterschreitungshäufigkeit von 30% in den einzelnen Räumen. Die Kastentanken der Boxplot-Grafik geben nicht die Quartile sondern die Quartile sondern die Standardabweichung an. Die Räume wurden entsprechend der gemessenen Überschreitungshäufigkeit von 26°C sortiert. Räume mit der Kennung [K] sind klimatisiert, alle übrigen Räume sind nicht klimatisiert. Die Balken der Häufigkeitskennwerte geben den Messunsicherheitsbereich an.

4.2. Ergebnisse der Messreihe Juli bis Dezember 2010

Tabelle 4.1.: Messdatenübersicht klimatisierter und unklimatisierter Räume des Universitätsklinikums Dresden aus der Messphase I (Juli bis Dezember 2010)

Kennwert	Alle Räume	klimatisierte Räume	unklimatisierte Räume
$\Theta_{I,air,avg}$	24.3°C	23.8°C	24.5°C
$\Theta_{I,air,min}$	20.0°C	21.2°C	19.6°C
$\Theta_{I,air,max}$	30.7°C	27.9°C	31.8°C
$\Phi_{I,air,avg}$	38.4 %	39.4 %	38.0 %
$\Phi_{I,air,min}$	10.5 %	12.7 %	9.6 %
$\Phi_{I,air,max}$	70.8 %	73.2 %	69.8 %
$OT_{26^\circ C}$	15.0 %	12.5 %	16.0 %
$SFT_{30\%}$	28.7 %	25.7 %	29.8 %
$DT_{ISO15251}$	40%	29 %	46 %

Temperaturbereiche betrachtet, so können zumindest fünf⁴ der sieben klimatisierten Räume als zulässig eingestuft werden.

⁴Diese sind Raum 21.1.229, 58.E.48, 58.1.46, 58.F.307 und 59.3.125. Raum 58.E.06 und 58.1.09 sind ebenfalls klimatisiert, weisen jedoch höhere Überschreitungshäufigkeiten der Maximaltemperatur von 26°C als 5 % auf.

4.3. Bewertung der Zonen mittels vereinfachter Verfahren

Nachfolgend werden die unterschiedlichen Bemessungsverfahren auf die messtechnisch erfassten Räume des Universitätsklinikums Dresden angewandt. Die Übersicht dieser Auswertung enthält in Abbildung 4.3⁵. An Hand des Ergebnisvergleichs soll qualitativ festgestellt werden, ob die Verfahren für die unterschiedlichen Raumgeometrien, Konstruktionen und Nutzungseigenschaften schlüssige Ergebnisse erzeugen. Als Nutzungsrandbedingung der Verfahren wurden die Profile zur Energiebedarfsberechnung nach DIN 18599-10 angesetzt. Diese sind stärker differenziert⁶ und ungünstiger⁷ als die Nutzungsbedingungen der aktuellen DIN 4108-2. Es fanden der für das jeweilige Nutzungsprofil angegebene Mindestluftwechsel sowie die maximal zu erwartenden Nutzungswärmelasten Verwendung. Der mittlere Verschattungsgrad der Sonnenschutzsteuerung ist stark nutzungsabhängig. In Ermangelung einer Datengrundlage wurden für diesen Wert in allen Zonen 50 % angenommen.

⁵Eine alternative Darstellung befindet sich im Anhang dieser Arbeit auf Seite XXXII. Darin ist der Quotient aus zulässigem und ermitteltem Kennwert dargestellt.

⁶Im Gegensatz zur DIN 4108-2, welche lediglich zwischen Wohn- und Nichtwohngebäuden unterscheidet, enthält DIN 18599 ca. 40 unterschiedliche Profile für Nichtwohngebäude in denen typische Nutzungszeiten, Raumkonditionen, Außenluftförderströme, Beleuchtungskennwerte sowie Personen- und Nutzungswärmelasten aufgeführt sind. Als Raumtypen sind unter anderem Einzelbüros, Besprechungsräume und Zweibettzimmer im Krankenhaus aufgeführt. [siehe DIN V 18599-10 (2011), S.33 ff]

⁷DIN 4108-2 gibt für Nichtwohngebäude mittlere Wärmelasten von $6 \frac{W}{m^2}$ und Luftwechselzahlen von 1,3 bis $3,0 \frac{1}{h}$ an. DIN 18599-10 gibt im Vergleich dazu für ein Büro (Profil 2, hohe Belegungsdichte von $10 \frac{m^2}{Pers}$, zwei Personen) Wärmelasten von 7 bis $15 \frac{W}{m^2}$ und Luftwechselzahlen von ca. 1.0 bis $1.5 \frac{1}{h}$ an. Die geringeren Luftwechselzahlen und die höheren Nutzungswärmelasten in DIN 18599 führen zu höheren Raumlufttemperaturen.

4.3. Bewertung der Zonen mittels vereinfachter Verfahren

Damit die Vergleichbarkeit gewährleistet ist, wurden einheitliche Klimadaten angewandt. Das Verfahren nach Hauser & Gertis beinhaltet nicht anpassbare Klimarandbedingungen. Der darin verwendete Datensatz wurde nicht hinreichend dokumentiert. Da aber die betreffende Norm auf die Testreferenzjahre 2004 Bezug nimmt, wurde das Testreferenzjahr 2004 Zone 4 für die übrigen Verfahren angesetzt. Die Klimadaten wurden zu diesem Zweck so aufbereitet, dass der mittlere Strahlungseintrag für die unterschiedlichen Ausrichtungen sowie die mittlere Temperatur für die unterschiedlichen Periodendauern berücksichtigt werden. Für das Verfahren nach Hauser & Otto wurden die Monatsmittelwerte, für das Verfahren nach Häupl die Periodenmittelwerte⁸ und für das Verfahren nach Petzold die Werte eines typischen Sommertages⁹ berechnet. Aus dieser Datenlage lässt sich bereits erkennen, dass die unterschiedliche Nachweisperiodenlänge die Vergleichbarkeit der Verfahren vereitelt, da trotz gleichem Ausgangsdatsatz unterschiedliche Klimarandbedingungen einfließen.

Der qualitative Vergleich wurde durch eine lineare Korrelationsanalyse¹⁰ der Eingangskennwerte und der Verfahrensergebnisse ergänzt. Um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen, wurde zur Auswertung der Quotient aus berechnetem Kennwert und gegebenem Grenzwert der jeweiligen Verfahren angesetzt¹¹. Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse sind in Tabelle 4.2 enthalten. Aus den Korrelationsfaktoren der Verfahrensergebnisse ist erkennbar, welche Eingangswerte in den Verfahren zu einer Verbesserung (Werte < 0) und welche zu einer Verschlechterung (Werte > 0) des Sommerlichen Wärmeverhaltens führen. Es wird deutlich, dass die linearen Abhängigkeiten in den Modellen nach Hauser & Gertis, Petzold und Häupl ähnlich und plausibel sind. Der Fensterflächenanteil wirkt sich verschlechternd und die Speicher- masse verbessernd auf den Sommerlichen Wärmeschutz aus. Unschlüssig erscheinen die Ergebnisse des Hauser & Otto- Verfahrens. Insbesondere die begünstigende Wirkung des effektiven Fensterflächenanteils ist paradox. Dieser Einfluss ist darauf zu-

⁸Das sommer- fokussierte Testreferenzjahr 2004 Zone 4 widerspiegelt den Sommerverlauf am Standort Potsdam im Jahr 1983. In dieser Phase existieren zwei Schönwetterperioden: 19.06.-24.06.1983(1); 23.07.-26.07.1983(2). Zur Auswertung wurde die erste Phase gewählt, da diese dem jährlichen Strahlungsmaximum am nächsten kommt.

⁹Hierfür wurde ein Tag der ersten Sommerperiode, der 24.06.1983, gewählt.

¹⁰Der nachfolgend aufgeführte Korrelationsfaktor nach Bravais & Pearsons nimmt Werte zwischen -1 und 1 an und gibt an, wie stark zwei statistische Variablen linear voneinander abhängig sind. Bei vollständiger, positiver linearer Abhängigkeit beträgt der Koeffizient +1, bei negativer -1. In der Interpretation der Faktoren ist zu beachten, dass Beträge unter 0,3 praktisch nicht interpretierbar sind.

¹¹Diese Quotientenkennwerte sind in Abbildung A.8 im Anhang dieser Arbeit auf Seite XXXII aufgeführt. Eine Erläuterung zur Interpretation enthält die Bildunterschrift.

4. Kritische Bewertung der Handrechenverfahren und des Simulationsverfahrens

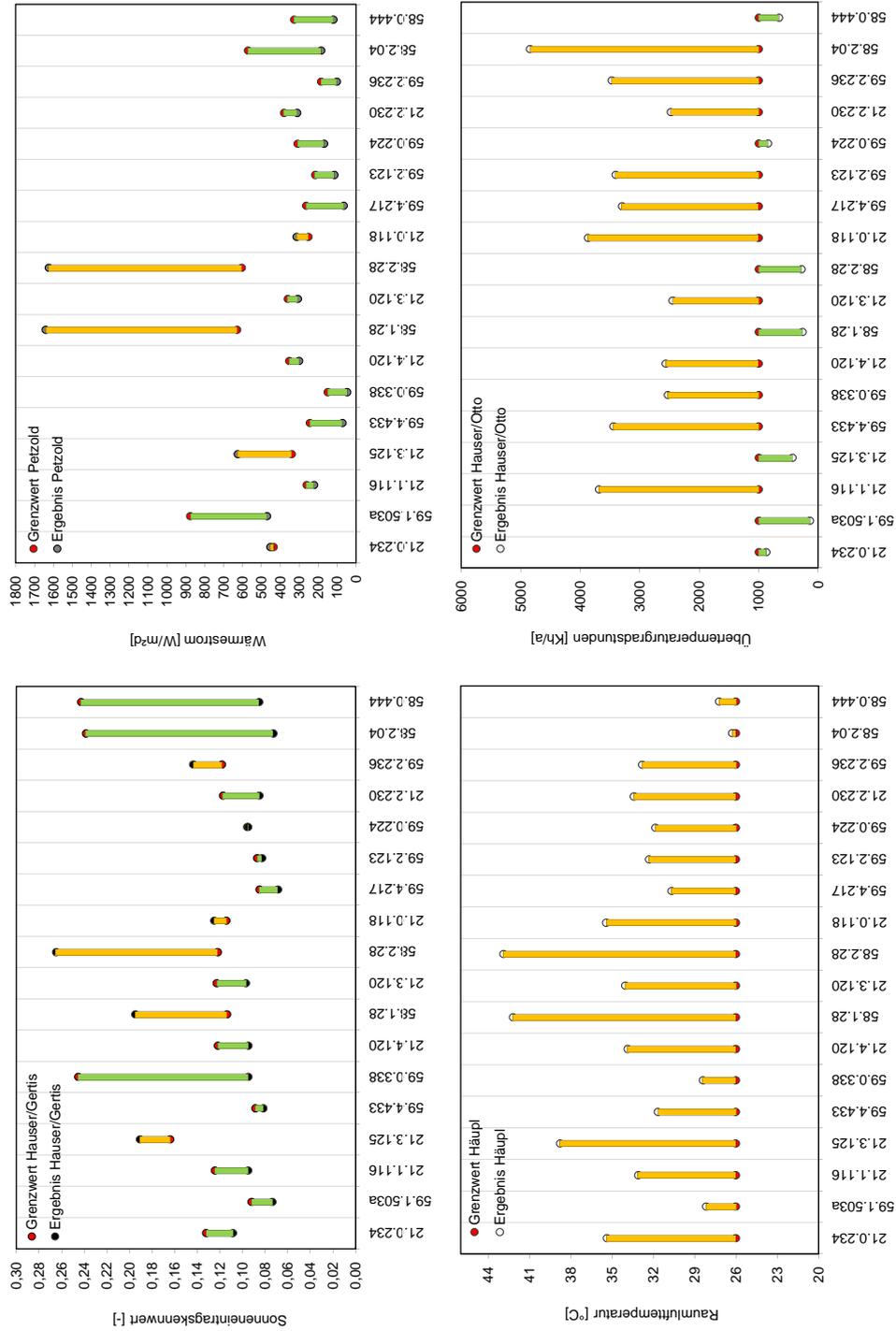


Abbildung 4.3.: Darstellung der Verfahrensergebnisse nach Hauser & Gertis (Sonneneintragskennwert), Petzold (äußere Wärmestromdichte), Häupl (Tagesmitteltemperatur) und Hauser % Otto (Übertemperaturgradstunden) für die nicht klimatisierten Räume. Die Räume sind entsprechend ihrer gemessenen Überschreitungshäufigkeit angeordnet. Negative Abweichungen des berechneten Kennwertes zum Grenzwert (zulässige Räume) sind grün dargestellt, positive Abweichungen sind orange dargestellt.

4.3. Bewertung der Zonen mittels vereinfachter Verfahren

Tabelle 4.2.: Korrelationsfaktoren $\varrho_{B,P}$ nach Bravais & Pearsons für die Eingangskennwerte und die Verfahrensergebnisse (Quotientenausgabe) der verschiedenen Vorbemessungsverfahren. Werte unterhalb eines Betrages von 0.3 sind nicht aufgeführt ([-]).

Verfahren	mittlerer Luftwechsel [Tag]/[Nacht]	Tages- mittel Innere Wärme- last	effektiver Fenster- flächen- anteil	Speicher- masse
Hauser & Gertis	[-]/[-]	[-]	0,7	-0,4
Petzold	[-]/[-]	[-]	0,8	-0,6
Häupl	[-]/[-]	[-]	0,8	-0,6
Hauser & Otto	[-]/[-]	[-]	-0,4	0,3

rückzuführen, dass das Verfahren die Transmissionsverluste für den Sommerfall auf Grund der Annahme von klimatischen Monatsmittelwerten für die Lufttemperatur stark überschätzt. Ein ähnlich abwegiger Zusammenhang ist für den Einfluss der Speichermassen zu erkennen. Da die Berücksichtigung dieser Speicherfähigkeit indirekt über die Koeffizienten (a,b) erfolgt, kann hierfür keine Interpretation erfolgen.

Zur weitergehenden Interpretation der Verfahrensergebnisse wurde die Korrelationsanalyse auch für die Eingangsdaten der Berechnungen durchgeführt. Eine Übersicht der Abhängigkeiten befindet sich im Anhang auf Seite XXXI. Die daraus ersichtliche hohe positive Korrelation zwischen Luftwechsel und innerer Wärmelast ($\varrho_{B,P} = 0,9$) beruht auf dem Personenbezug beider Werte. Darüber hinaus bestehen nennenswerte negative Abhängigkeiten zwischen dem effektiven Fensterflächenanteil und der Speichermasse ($\varrho_{B,P} = -0,7$) sowie zwischen der inneren Wärmelast und der Nettogrundfläche ($\varrho_{B,P} = -0,6$). Da die Außenwände, insbesondere bei Trockenbautrennwänden und verkleideten Decken- und Bodenkonstruktionen, einen relevanten Anteil der Speichermassen darstellen, führt eine Reduktion des Außenwandanteils bzw. eine Vergrößerung des Fensterflächenanteils zu einer Reduktion der Speichermassen. Ebenso führt sie zu einer Vergrößerung des mittleren U-Wertes, da der Wärmedurchgangskoeffizient der Fenster deutlich über jenem der Wände liegt. Der Zusammenhang zwischen Nettogrundfläche und innerer Wärmelast lässt sich dadurch erklären, dass die Nutzungslasten vorrangig durch Personen verursacht werden und in der Mehrzahl der Räume konstant zwei Nutzer vorgesehen sind.

4. Kritische Bewertung der Handrechenverfahren und des Simulationsverfahrens

4.3.1. Vergleich der Verfahrensergebnisse mit den Messungen

Um eine Aussage über die Qualität der Verfahren treffen zu können, ist der Vergleich der Verfahrensergebnisse mit Messwerten¹² erforderlich.

Die Verfahren werden dahingehend mit den Messwerten verglichen, ob sie eine Zulässigkeit vorhersagen oder nicht. Die Gegenüberstellung wird für die Bedingung vorgenommen, dass die gemessene Überschreitungshäufigkeit $OT_{26^{\circ}C}$ auf weniger als 10 % der Gesamtmesszeit (eig. Nutzungszeit) zu begrenzen ist. Als alternative Bedingung wurde die Begrenzung der gemessenen maximalen Raumlufttemperatur θ_{max} auf $30^{\circ}C$ gewählt (siehe Anhang, S. XXXIII). Die Ergebnisübersicht enthält Abbildung 4.4. Von Interesse sind in dieser Abbildung vor allem jene Räume, in welcher die Abweichungsbalken die 100 %- Markierung (rote Linie) durchkreuzen. In diesem Fall unterscheiden sich Verfahrensaussage und Messergebnis, da Werte < 100 % eine Zulässigkeit bescheinigen und Werte > 100 % eine Unzulässigkeit quittieren. Eine Zusammenfassung der qualitativen Verfahrensaussagen enthält Tabelle 4.3.

Tabelle 4.3.: Übersicht über die Raumbewertung durch die unterschiedlichen Vorbemessungsverfahren

Anforderung	$OT_{26^{\circ}C} < 10 \%$	$\theta_{max} = 30^{\circ}C$
Unzulässige Räume laut Messung	14	12
davon unzulässig nach Hauser & Gertis	3	2
durchschnittliche Abweichung	86 %	35 %
davon unzulässig nach Petzold	3	2
durchschnittliche Abweichung	114 %	64 %
davon unzulässig nach Häupl	13	11
durchschnittliche Abweichung	58 %	26 %
davon unzulässig nach Hauser & Otto	8	8
durchschnittliche Abweichung	192 %	157 %

Aus dieser Gegenüberstellung ist zu erkennen, dass die Verfahren zum Teil erhebliche Abweichungen von den realen Messergebnissen erzielen. Die wünschenswerte Anforderung, Ergebnisse zu erzeugen, welche einen ausreichenden Sicherheitszuschlag beinhalten und alle kritischen Räume als unzulässig ausweisen, kann keines der Verfahren erfüllen.

¹²Für die Gegenüberstellung der Mess- und Berechnungswerte wurden nur die 18 nicht klimatisierte Zonen betrachtet.

4.3. Bewertung der Zonen mittels vereinfachter Verfahren

Die beste Vorhersagesicherheit bietet das Häupl- Verfahren, die zweitbeste Trefferquote das Verfahren nach Hauser und Otto. Die qualitative Aussagefähigkeit der Verfahren nach Hauser/Gertis und Petzold ist identisch.

Im Vergleich der Spannweite zwischen den Ergebnissen der verschiedenen Verfahren in Abb. 4.4 wird deutlich, dass die Verfahren Hauser & Gertis, Petzold und Häupl einen ähnlichen Verlauf aufweisen, d.h. es existiert qualitativ eine Übereinstimmung, welche Räume im Bezug auf den Sommerfall als weniger kritisch und welche als problematisch einzustufen sind. Die Ergebnisse des Verfahrens nach Hauser & Otto sind diesem Verlauf konträr.

4. Kritische Bewertung der Handrechenverfahren und des Simulationsverfahrens

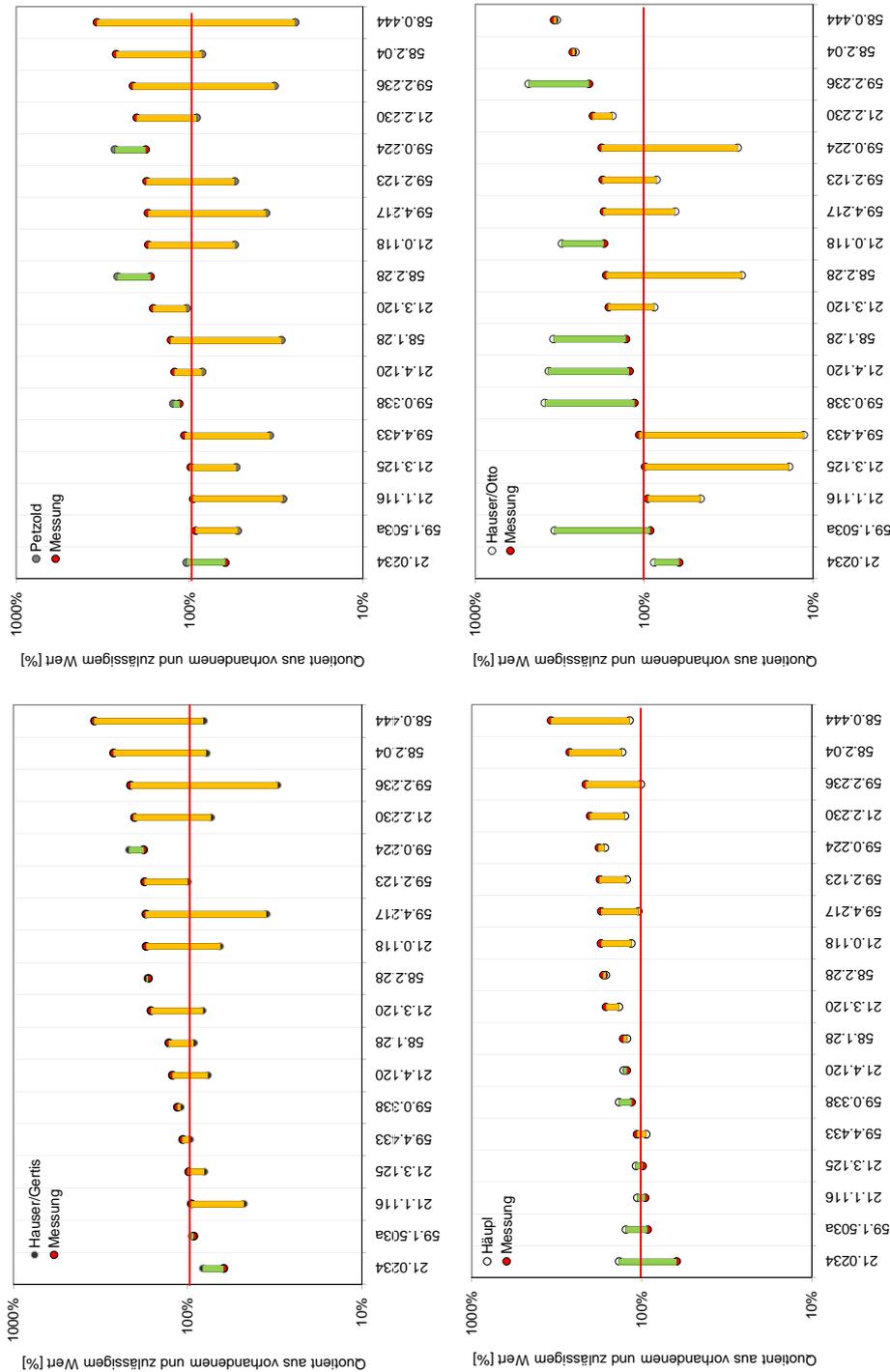


Abbildung 4.4.: Darstellung der Verfahrensergebnisse und der Messergebnisse als Quotient aus zulässigem und vorhandenem Wert für alle nicht klimatisierten Räume in den Bauten des Universitätsklinikums in der Messphase I (Juli-Dezember 2010). Die Messwerte wurden ebenfalls als Quotient aus Ist- Wert (gemessene relative Überschreitungshäufigkeit von 26°C) und Grenzwert (10 %) dargestellt. Werte über einem Verhältnis von 1 (100 %) bedeuten, dass der betreffende Raum nach Messung bzw. nach Bewertung unzulässig ist. Die Abweichungskennzeichnung zwischen Messwert und Kennwert ist orange sofern der Messwert den Kennwert überschreitet und grün sofern der Kennwert oberhalb des Messwertes liegt.

4.3.2. Verfahrenseinschätzung Hauser & Gertis

Das Verfahren nach Hauser & Gertis beruht in seiner derzeitigen Form auf Simulationsrechnungen von Büro- bzw. Wohngebäuden. Ausgewählte Einflussparameter wurden in Teilfaktoren überführt welche aus den Simulationsrechnungen ermittelt wurden. Deren Summe wird als Sonneneintragskennwert einem zulässigen Kennwert, dem Quotient aus effektiver Glasfläche zur Grundfläche des Raumes, gegenübergestellt.

Die Nachweisführung besteht in einer Auswahl und Aufsummierung von Kennwerten aus den bereitgestellten Tabellen. Eine Berücksichtigung der Speichermassen, des Nachluftwechsel usw. erfolgt daher stufenweise. Andere Bedingungen und Konstruktionseigenschaften wie die Nutzungswärmelasten sind als Vorgabewerte enthalten und können kaum variiert werden.

Der Nachteil dieses Verfahrens ist in dessen fehlender Flexibilität zu sehen. So kann beispielsweise für höhere Belegungsdichten bzw. höhere Nutzungswärmelasten keine Annahme getroffen werden. Ebenso ist keine Anpassung an strengere Standortbedingungen (z.B. Stadtklima) oder eine Berücksichtigung von relevanten Wärmeeinträgen über Außenkonstruktionen (z.B. Flachdach) möglich.

Das Ergebnis des Verfahrens, der Sonneneintragskennwert, ist weder physikalisch interpretierbar noch lässt er quantitative Rückschlüsse auf das sich einstellende Raumklima zu.

Die Aussagefähigkeit des Verfahrens erweist sich selbst für Räume mit Büronutzung als ungenügend. Diese Unterschätzung führt in 11 Fällen zu einer falschen Zulässigkeitsbewertung. Das Verfahren ist daher nicht zur Vorbemessung des Sommerlichen Wärmeschutzes zu empfehlen.

4.3.3. Verfahrenseinschätzung Petzold

Das Verfahren nach Petzold gliedert sich in einen Nachweisansatz für die äußeren und einen für die inneren Wärmelasten. Im vorliegenden Verfahrenvergleich wurde ausschließlich der Ansatz zur Überprüfung der äußeren Lasteinträge bewertet da dieser die baulichen Gegebenheiten bewertet.

In der Nachweisführung finden die Transmissionswärmeströme über Außenbauteile und zu angrenzenden Räumen sowie die Strahlungswärmeströme Berücksichtigung.

4. Kritische Bewertung der Handrechenverfahren und des Simulationsverfahrens

Der Speichermasseneinfluss wird in Form eines Tabellenkennwertes veranschlagt. Eine Anpassung der Eingangskennwerte ist, bis auf den Speichermasseneinfluss, möglich. Gleiches gilt für die Anpassung der Klimarandbedingungen. Darüber hinaus kann im Verfahren zwischen Nutzersensibilitätskategorien unterschieden werden.

Das Ergebnis des Verfahrens (Wärmestrombilanz) ist zwar physikalisch interpretierbar, jedoch nur eingeschränkt auf die sich praktisch einstellen Raumklimaverhältnisse (Lufttemperatur) überführbar.

Die Aussagefähigkeit des Verfahrens stimmt mit dem Hauser & Gertis - Verfahren überein. Von beiden Verfahren werden die gleichen Räume unter- bzw. überschätzt. Auch im Petzold- Verfahren werden von 14 Räumen, welche aus der Messung als unzulässig einzustufen sind, 11 als zulässig bewertet. Damit ist auch dieses Verfahren nicht zur Vorbemessung des Sommerlichen Wärmeschutzes geeignet.

Das Petzold-Verfahren bietet jedoch Möglichkeiten zur Anpassung. So könnte der Nachweisansatz so korrigiert werden, dass eine Bilanz aller inneren und äußeren Wärmeströme, ähnlich dem Häupl- Ansatz, für den Raum aufgestellt wird, d.h. auch Nutzungs- und Lüftungswärmeströme in die Bilanzgleichung eingehen. In der jetzigen Form erfolgt eine separate Bilanzierung dieser Nutzungswärmeströme.

4.3.4. Verfahrenseinschätzung Häupl

Das Verfahren nach Häupl beruht auf einer Funktion welche den Aufheiz- bzw. Einschwingprozess der Raumkonstruktion und der Raumluft beschreibt. Im Ansatz wird vereinfachend davon ausgegangen, dass sämtliche Lasten konstant vorliegen und Strahlungs- und Nutzungswärmelasten keinen Einfluss auf die Einstellzeit nehmen.

Die Nachweisführung besteht in der Ermittlung der Lastkennwerte sowie einer Berechnung der Einstellzeit, der Temperatur nach unendlich langer Aufheizzeit und der Temperatur nach fünftägiger Aufheizzeit. Das Verfahren kommt gänzlich ohne Tabellen- und Korrekturwerte aus.

Das Verfahren ist sehr variabel und erlaubt die Anpassung der Nutzungs- und Lüftungswärmelasten, der meteorologischen Randbedingungen und der Konstruktions-eigenschaften. Sämtliche Einflusskennwerte können in Form von zusätzlichen Ent-

4.3. Bewertung der Zonen mittels vereinfachter Verfahren

oder Belastungsthermen in die existierenden Gleichungen eingefügt werden. Die Berücksichtigung von Nutzerempfindlichkeiten könnte über die Anpassung der zulässigen Tagesmitteltemperatur nach der fünftägigen Aufheizphase erfolgen.

Das Verfahrensergebnis, die Tagesmitteltemperatur, ist eingeschränkt auf praktische Verhältnisse übertragbar, da dieser Wert von der Tagesamplitude überlagert wird und sich diese sehr unterschiedlich darstellen kann.

Die Aussagefähigkeit des Verfahrens ist unter den gegenübergestellten Verfahren am besten. Von 14 Räumen welche in der Messung eine Überhitzungszeit von über 10 % aufweisen und damit unzulässig sind, wird lediglich ein Raum als zulässig eingestuft. Das Häupl- Verfahren ist daher zur Vorbemessung des Sommerlichen Wärmeschutzes geeignet.

4.3.5. Verfahrenseinschätzung Hauser & Otto

Das Verfahren nach Hauser & Otto überführt die Ergebnisse der Heizwärmebedarfsberechnung, das Gewinn- Verlust- Verhältnis, in einen Kennwert des Sommerlichen Wärmeschutzes, die Übertemperaturgradstunden. Dabei werden unterschiedliche Anpassungsfaktoren in die Bilanz eingeführt, welche aus den Simulationsrechnungen ermittelt wurden.

Der Verfahrensansatz ist, basierend auf den Ergebnissen in Tabelle 4.2 und Abbildung 4.4 bzw. Tabelle 4.3 sehr kritisch zu bewerten. Es ist fragwürdig, ob aus der Monatsbilanz eines Raumes auf den Sommerfall, d.h. die Übertemperaturgradstunden, geschlossen werden kann. Da die betreffenden Verfahren (Rouvel & Kolmetz und Hauser & Otto) lediglich den Quotient aus den mittleren monatlichen Gewinnen und Verlusten verwenden, kann ein Raum mit einem schlechten sommerlichen Wärmeschutz (z.B. durch große Fensterflächen) von einem gleichzeitig schlechten winterlichen Wärmeschutz (z.B. hohe Transmissionsverluste durch große Fensterflächen) profitieren. Dabei reduzieren diese Verluste das sommerliche Tagesmaximum der Lufttemperatur nur marginal. Die Vielzahl der nicht nachvollziehbaren Korrekturfaktoren im Verfahren deutet darauf hin, dass dieser Rückschluss nicht möglich ist.

Das Ergebnis des Verfahrens, die zu erwartenden Kelvinstunden einer Grenztemperatur, ist physikalisch interpretierbar, jedoch eingeschränkt in die sich praktisch einstellenden sommerlichen Raumklimabedingungen überführbar.

4. Kritische Bewertung der Handrechenverfahren und des Simulationsverfahrens

Die Aussagefähigkeit des Verfahrens ist als mittelmäßig einzustufen. Von den 14 laut Messung unzulässigen Räumen werden 8 als solche eingestuft. Das Verfahren ist folglich nicht zur Vorbemessung des Sommerfalls geeignet.

Eine Anpassung des Verfahrens ist nicht aussichtsreich, da in sämtlichen Gleichungen unzureichend dokumentierte Korrekturfaktoren enthalten sind.

4.4. Bewertung der Zonen mittels Simulationsverfahren

4.4.1. Modellauswahl

Für die Erstellung des Simulationsmodells in Energy Plus, Version 7.1, stehen verschiedene Modelle, z.B. für die Berechnung des Wärmestroms durch die Raumschließungsbauteile, zur Auswahl. Für einfache Simulationsrechnungen, in denen die Eingangsdaten (Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten etc.) mit einem großen Unsicherheitsfaktor einfließen, ist die Anwendung der Standardmodelle angebracht. Eine Übersicht der für die nachfolgenden Simulationsrechnungen verwendeten Modelle enthält Abbildung 4.5.

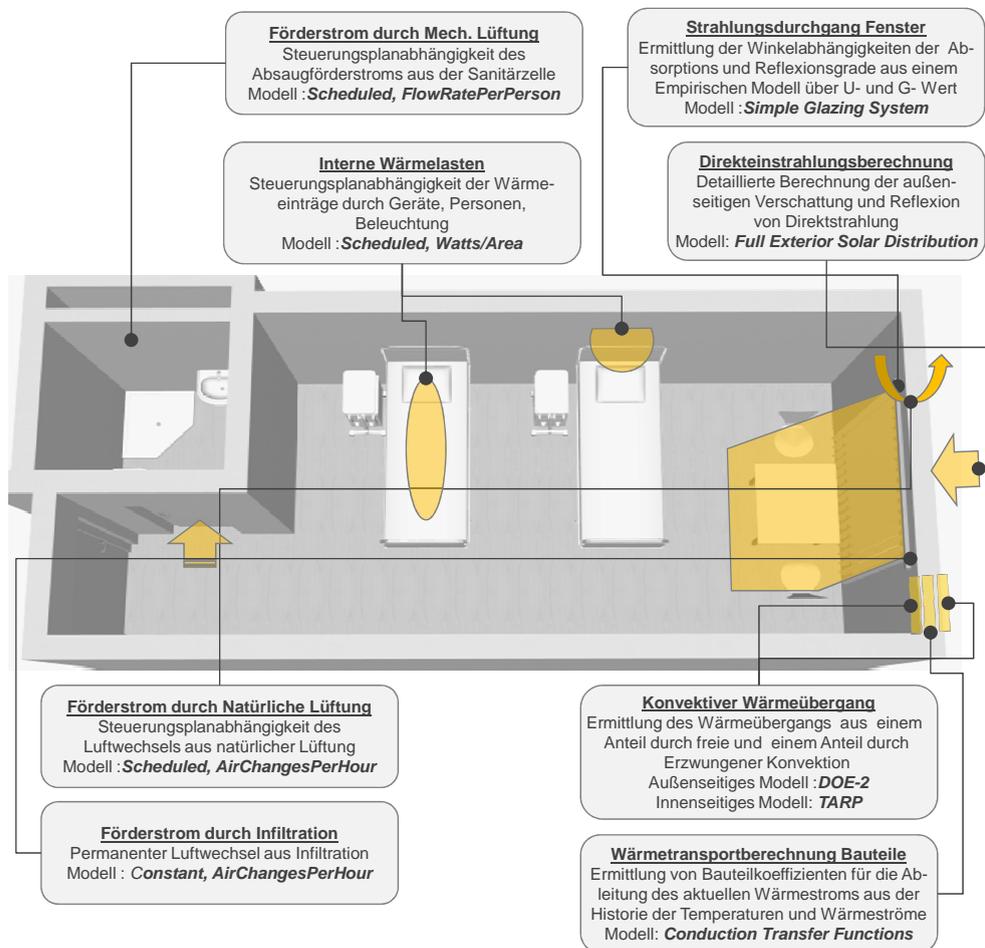


Abbildung 4.5.: Berechnungsansätze bzw. Modellauswahl für die Simulationsrechnungen mit EnergyPlus Vers. 7.1

4. Kritische Bewertung der Handrechenverfahren und des Simulationsverfahrens

4.4.2. Nutzungsrandbedingungen

Da die Datenverfügbarkeit im Vorbemessungsfall gering ist, müssen insbesondere für die Lasten- und Nutzungsjahresprofile sinnvolle Annahmen getroffen werden. Im nachfolgenden Fall wurden die Angaben der DIN 18599-10 zum Mindestluftwechsel und den Nutzungswärmelasten angesetzt. Eine Alternative stellen die in der aktuellen DIN 4108-2 aufgeführten Randbedingungen dar. Dabei handelt es sich jedoch um wesentlich unkritischere Bedingungen.

Als Randbedingungen wurden für die nutzungsbedingten Wärmelasten aus Personen und Geräten $12 \frac{W}{m^2}$ angenommen. Für den Luftwechsel (Infiltration, Fensterlüftung und mechanische Lüftung) wurde angenommen, dass der Volumenstrom $4 \frac{m^3}{h \cdot m^2}$ beträgt. Die Solltemperatur für die Beheizung beträgt $20^\circ C$. [Anhang A, Nr.10, DIN 18599-10] Für die Sonnenschutzsteuerung wurde eine freie Annahme getroffen. Demnach sind permanent 50% der Fensterfläche vom Sonnenschutz bedeckt.

4.4.3. Klimarandbedingungen

Zur Einschätzung der Simulationsergebnisse wurden drei unterschiedliche Wetterdatensätze angewandt. Der erste Datensatz stellt das im Messzeitraum erfasste Außenklima an der Station Dresden- Klotzsche dar. Diese Messstation befindet sich außerhalb des Stadtgebietes und zudem auf einer Anhöhe. Die Simulationsergebnisse sollten daher geringere Überschreitungshäufigkeiten vorhersagen als gemessen wurden. Die übrigen beiden Klimadatensätze stellen die für die Sommerbemessung vom Deutschen Wetterdienst herausgegebenen extremen Testreferenzjahre (Standortregion 4) dar. [Wetterdienst, 2011] Deren Anwendung müsste, da es sich um Extremwertdatensätze handelt, zu einer Überschätzung der Messergebnisse führen, d.h. die berechneten Überschreitungshäufigkeiten sollten über denen der Messung liegen.

4.4.4. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen enthält Abbildung 4.6. Die Abbildung enthält linksseitig ein Diagramm in welchem für jeden Raum die gemessene und die mit drei verschiedenen Verschattungsvarianten simulierte Überschreitungshäufigkeit von $26^\circ C$, $OT_{26^\circ C}$, aufgetragen ist. Diese gibt an, zu welchem Anteil der

4.4. Bewertung der Zonen mittels Simulationsverfahren

Gesamtsimulations- bzw. Gesamtmesszeit die Stundenwerte der Lufttemperatur oberhalb von 26°C liegen. Die beiden rechtsseitigen Diagramme geben diesen Kennwert in der Darstellungsform der Handrechenverfahren für die extremen Klimadatenätze, das sommerliche Testreferenzjahr 2004 (oben) sowie 2011 (unten) an. Diese Diagramme enthalten ebenfalls die Kennwerte der Messung. Die Spannweite gibt die Differenz zwischen Mess- und Simulationwert für $OT_{26^{\circ}\text{C}}$ an. Ein orangefarbener Spannweitenbalken kennzeichnet, dass der Messwert über dem Simulationwert liegt.

Es ist zu erkennen dass mit den gewählten ungünstigen Nutzungsrandbedingungen¹³ und Klimarandbedingungen (TRY 2004 und TRY 2011) eine sichere Prognose der Überschreitungshäufigkeit gewährleistet ist. In allen Fällen sind Räume mit einer gemessenen unzulässigen Überschreitungshäufigkeit auch nach den Simulationsergebnissen als kritisch einzuschätzen. Allerdings wurden sowohl die vier zulässigen Räume deutlich überschätzt, als auch die vier nach Messung kritischsten Räume deutlich unterschätzt.

Es kommen mehrere Ursachen für diese Fehleinschätzung der Simulationsrechnungen in Frage. Neben den Unsicherheitsbereichen der Messung und der Simulationsrechnung sind dies Ungenauigkeiten in der Eingabe der Gebäudegeometrie und den Baustoffkennwerten. Einen großen Unsicherheitsfaktor stellen darüber hinaus die Nutzungsrandbedingungen, beispielsweise die Sonnenschutzsteuerung, dar.

Zur Überprüfung dieses Einflusses wurden beispielhaft zwei weitere Varianten der Sonnenschutzsteuerung simuliert (linke Grafik Abb. 4.6). Im ersten Fall ist der Sonnenschutz ständig vor dem Fenster (100 %), im zweiten Fall ist kein Sonnenschutz vorhanden und im dritten Fall bedeckt der Sonnenschutz permanent 50 % der Fensterfläche. Es ist zu erwarten, dass sich die Messergebnisse zwischen den beiden Extremfällen einordnen. Entgegen dieser Annahme ist es jedoch so, dass es Fälle gibt, in denen die Simulation eine stärkere Überhitzung vorhersagt als gemessen wurde und Fälle, in denen die Simulation günstigere Bedingungen als die Messung prognostiziert. Die Hälfte aller Messungen liegt außerhalb dieses gewählten Extrembereichs.

Aus dieser Gegenüberstellung sind zwei Schlussfolgerungen zu ziehen. Erstens ist der Einfluss der Sonnenschutzsteuerung auf die prognostizierte Überhitzungszeit sehr groß. Zweitens muss es neben der Sonnenschutzsteuerung weitere Unsicherheitsfak-

¹³Die Luftwechselraten aus natürlicher Belüftung, Infiltration und Mechanischer Belüftung sind relativ gering, die Nutzungswärmelasten relativ groß. Siehe Abschnitt 3.3.2 auf Seite 61

4. Kritische Bewertung der Handrechenverfahren und des Simulationsverfahrens

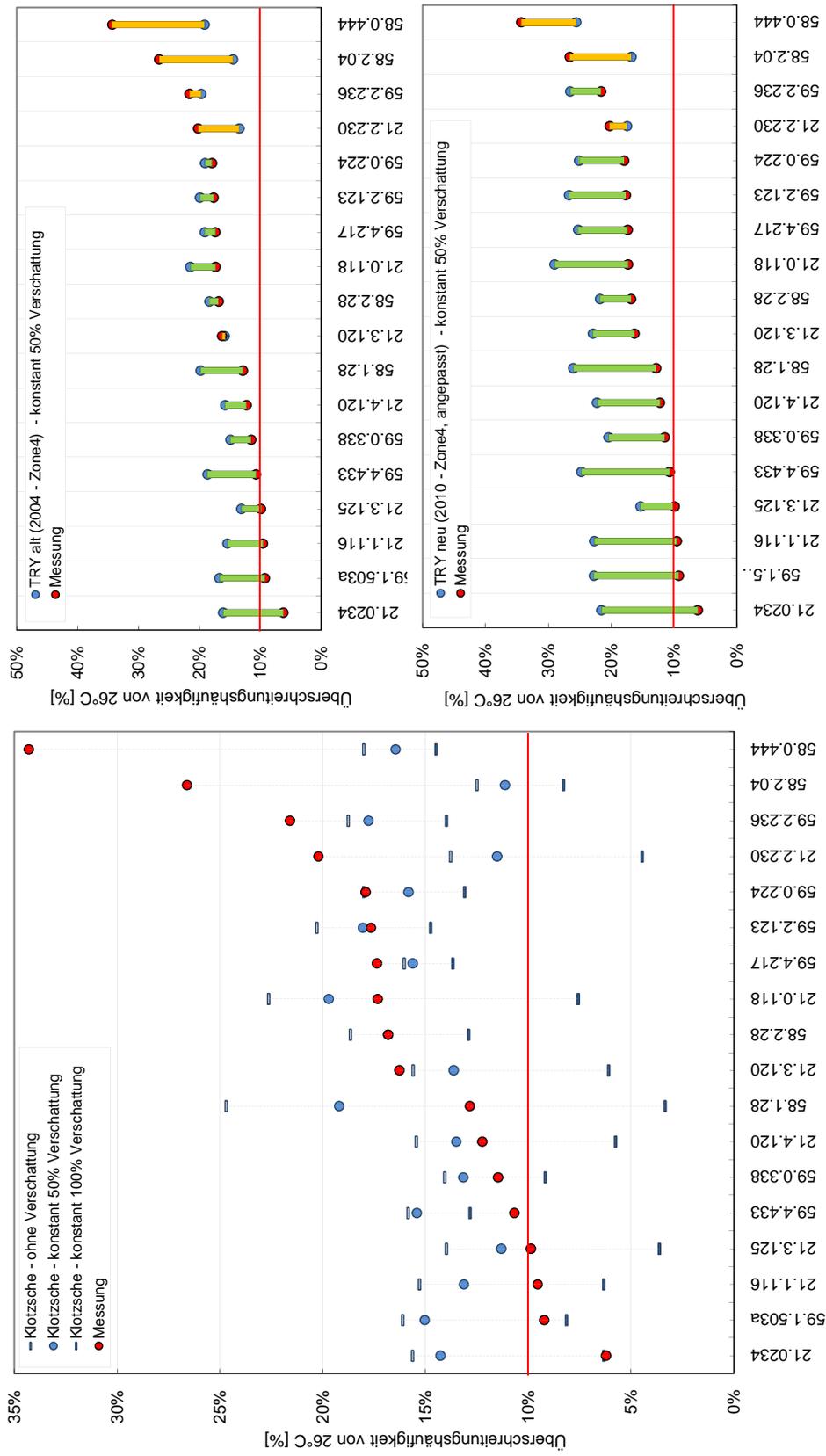


Abbildung 4.6.: Ergebnisse der Simulationsrechnungen für die in Messphase I (Juli-Dezember 2010) gemessenen nicht klimatisierten Räume des Universitätsklinikums Dresden. Die Abbildungen enthalten die simulierte Überschreitungshäufigkeit von 26 °C im Vergleich zum gemessenen Wert. Die Räume sind entsprechend der Messwerte sortiert. Die rechtsseitig dargestellten Werte wurden mit den Testreferenzjahren der Jahre 2004 und 2010 (Zone 4) ermittelt. Die linksseitig dargestellten Simulationsergebnisse wurden mit dem zeitgleichen Wetterdatensatz Dresden-Klotzsche berechnet.

4.4. Bewertung der Zonen mittels Simulationsverfahren

toren des Umgebungsklimas, der Nutzungscharakteristik usw. geben, welche das Ergebnis maßgeblich beeinflussen.

4.5. Zusammenfassung Verfahrensbewertung

An Hand der ersten Messperiode wurden die gegenwärtig zur Verfügung stehenden Verfahren zur Bemessung des Sommerlichen Wärmeschutzes verglichen. Als Zulässigkeitskriterium wurde die relative Überschreitungshäufigkeit einer Raumlufttemperatur von 26°C an weniger als 10% der Gesamtzeit angesetzt.

Von 18 nicht klimatisierten, messtechnisch erfassten Zonen erwiesen sich demnach 14 als unzulässig. Mit Hilfe der Simulationsrechnungen mit extremen Klimadaten-sätzen (Sommer- Testreferenzjahre 2004 und 2011) wurden alle Räume als unzulässig eingestuft, auch die vier Räume mit unkritischen Messergebnissen. Von den vier Räumen mit der stärksten Überschreitungshäufigkeit wurden 4 (TRY 2004) bzw. 3 (TRY 2011) Zonen von der Simulation als deutlich weniger kritisch eingestuft. An Hand der Simulation mit standortnahen Klimadaten wurde die Vermutung aufgestellt, dass diese Fehleinschätzung auf ungenaue Simulationsrandbedingungen (Klima- und Nutzungsrandbedingungen) zurückzuführen ist.

Die vereinfachten Nachweisverfahren konnten lediglich einen Teil der kritischen Zonen als unzulässig identifizieren. Das beste Verfahren (Häupl) erkannte 13 Räume als unzulässig, die schlechtesten Verfahren (Hauser& Gertis, Petzold) lediglich 3. Von diesen Verfahren ist daher einzig das Verfahren von Häupl zur Vorbemessung zu empfehlen. Hier könnte eine Verbesserung, ebenso wie für die Simulation, eventuell über realistischere Randbedingungen erreicht werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Simulation zwar einen sicheren Ansatz zur Bemessung des Sommerlichen Wärmeschutzes darstellt, jedoch in einigen Fällen große negative und positive Abweichungen vom gemessenen Kennwert erzeugt. Als eine Ursache dieser Abweichungen kommen, neben den Klimarandbedingungen, die Nutzungsbedingungen in Betracht. Da deren Einfluss immens ist, müssen Möglichkeiten zur Eingrenzung bzw. Identifizierung dieser Profile gefunden werden.

5. Entwicklung eines eigenen Kalibrierverfahrens

Der nachfolgende Abschnitt befasst sich mit der Entwicklung eines eigenen Kalibrierverfahrens für das Simulationsmodells. Dieser Ansatz ist erforderlich, weil die bekannten Kalibrieransätze für Gebäudesimulationsmodelle im Allgemeinen dafür verwendet werden, unbekannte Einzelkennwerte (z.B. Wärmedurchgangskoeffizienten einzelner Bauteile) zu identifizieren. Sie setzen folglich eine hohe Qualität des Simulationsmodells voraus, in welchem auch die Nutzungsprofile und Außenklimadaten vollständig bekannt sein müssen. In vielen Fällen sind aber gerade diese Datensätze nicht vorhanden. Das trifft auch für die in dieser Arbeit verwendeten Simulationsmodelle zu.

Im Folgenden wird ein eigener Kalibrieransatz erarbeitet und vorgestellt, welcher die Identifizierung der Nutzungsprofile ermöglicht. Die Nutzungsprofile werden darin, basierend auf Stichprobenuntersuchungen und Abhängigkeitsdiagrammen, eingegrenzt und mit Hilfe einer hierarchischen Vorgehensweise identifiziert. Diese Prozedur wird am Beispiel mehrerer Räume angewandt und führt zu einer deutlichen Verbesserung der Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung.

5. Entwicklung eines eigenen Kalibrierverfahrens

5.1. Untersuchte Zonentypen der zweiten Messphase 2011

Zur Kalibrierung des Simulationsmodells für Patientenzimmer wurden in einer zweiten Messphase von Juni bis Dezember 2011 Messungen in den Räumen der Kinder- und Frauenklinik (Gebäude 21) durchgeführt. Dieser Bau weist einen kammförmigen Grundriss auf und beherbergt vorrangig zu den geöffneten Innenhöfen ausgerichtete und in den Obergeschossen befindliche Patientenzimmer. Es sind zwei Bereiche im Gebäude untergebracht, die Kinderklinikstationen und die Frauenklinikstationen. Beide Bereiche weisen eine Planbettenkapazität von jeweils 120 Stück auf.



Abbildung 5.1.: Ansichten der Fassade der Kinder- und Frauenklinik des Universitätsklinikums Dresden.

Die Kinder- und Frauenklinik ist als Stahlbetonkonstruktion ausgeführt, in den unteren Geschossen als Lochfassade, in den oberen Geschossen (2. bis 4.) als großflächig verglaster Skelettbau. Die Glasflächen bestehen aus einer Zweischeiben- Isolierverglasung. Der g-Wert wird in den Planungsunterlagen mit 0,4, der U-Wert mit 1,45 (Lochfassade) bzw. $1,6 \frac{W}{m^2K}$ (Glasfassade) angegeben. An den Obergeschossfassaden befinden sich Auskragungen bzw. Balkone. Als äußeres Verschattungssystem wurden Jalousien aus Aluminiumlamellen angebracht. Diese Jalousien sind raumweise steuerbar und werden ab einer Grenzwindgeschwindigkeit von ca. 16 bzw. $22 \frac{km}{h}$ sowie bei Temperaturen unter $2^\circ C$ hochgefahren. Die Beheizung der oberen Geschosse erfolgt über eine Fußbodenheizung, der unteren Geschosse über Radiatoren.

Im untersuchten Gebäude sind unterschiedliche Raumtypen der Patientenzimmer beherbergt. In den wenigen Patientenzimmern der Untergeschosse befinden sich Patienten der Intensivpflege. Diese Bereiche sind daher keine klassischen Zwei- Bett-

5.1. Untersuchte Zonentypen der zweiten Messphase 2011

Patientenzimmer. In den Obergeschossen dagegen befinden sich vorrangig Pflegebereiche mit Zwei- Bett- Zimmern. Es wurden von diesen Räumen drei Grundrisstypen ausgewählt, welche in Abbildung 5.2 aufgeführt sind. Unter diesen Typen ist auch der aus der Aufstellung in Kapitel 2.1(Tabelle 2.4) als meist verbreitete Grundrissform identifizierte I- Typ.

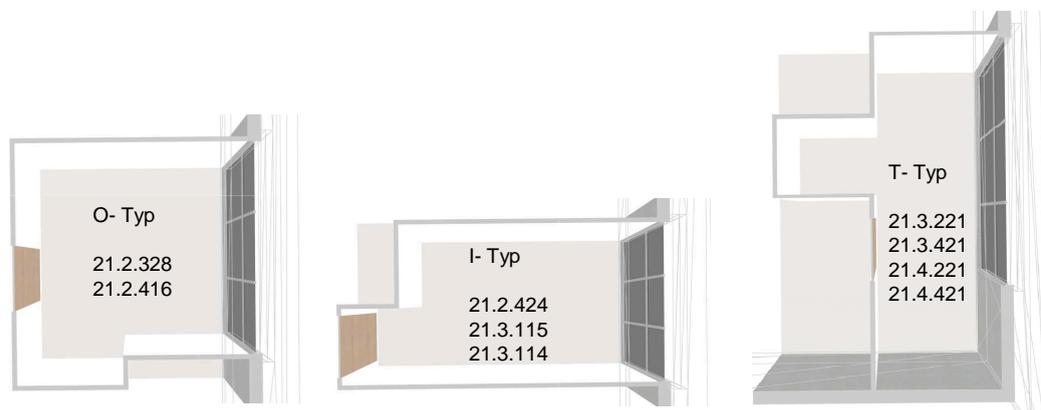


Abbildung 5.2.: Vogelperspektivische Darstellung der Patientenzimmertypen in denen Messungen durchgeführt wurden und Zuordnung der jeweiligen Raumkennungen zu diesen Typen.

Die ausgewählten Räume weisen einen auf die Außenwand bezogenen Fensterflächenanteil von etwa 40 bis 80 % mit vollständiger Bedienfreiheit für die Steuerung der Fensteröffnung sowie des inneren und äußeren Sonnenschutzes auf. Dabei ist der Fensterflächenanteil der T- und O- Typen mit ca. 60-80 % am größten. Die Mehrzahl der erfassten Räume ist Richtung Ost oder West orientiert.

Alle Räume werden natürlich belüftet. Die angrenzenden Sanitärzellen werden mechanisch entlüftet, die benachbarten Flure werden klimatisiert. Alle Räume sind als Zweitbettzimmer ausgelegt. Eine Übersicht der erfassten Räume und deren grundlegende Kennwerte befindet sich im Anhang auf Seite XXXVI.

Für die erwähnten Patientenzimmer wurde über einen Zeitraum von etwa einem halben Jahr (Juli bis Dezember 2011) der Verlauf der Raumluftfeuchte und der Raumlufttemperatur aufgezeichnet.

5. Entwicklung eines eigenen Kalibrierverfahrens

5.2. Ergebnisse der Messreihe Juli - Dezember 2011

Eine Übersicht der Messergebnisse für die gewählten Raumtypen enthält Abbildung 5.3. Eine Kennwertübersicht enthält Tabelle 5.1. Die betreffende Phase wies im Gegensatz zur ersten Messphase keine strengen mehrtägigen sommerlichen Hitzephase auf. Aus diesem Grund liegen die Temperaturkennwerte, insbesondere der Häufigkeitsverteilung, deutlich unter denen der ersten Messphase.

Tabelle 5.1.: Messdatenübersicht aller Räume des Universitätsklinikums Dresden aus der Messphase II (Juli bis Dezember 2011)

Kennwert	Alle Räume (unklimatisiert)
$\Theta_{I,air,avg}$	24.1°C
$\Theta_{I,air,min}$	19.1°C
$\Theta_{I,air,max}$	30.2°C
$\Phi_{I,air,avg}$	42.5 %
$\Phi_{I,air,min}$	16.8 %
$\Phi_{I,air,max}$	75.2 %
$OT_{26^\circ C}$	12.2 %
$SFT_{30\%}$	22.4 %
$DT_{ISO15251}$	71%

Im Durchschnitt aller Räume lagen die Raumlufttemperaturen in der Messphase zu 93 % innerhalb von 20 – 26°C sowie die relativen Raumluftfeuchten zu 77 % innerhalb von 30 – 70 %.

Für eine statistische Auswertung der unterschiedlichen Raumtypen ist die Anzahl der untersuchten Patientenzimmer pro Grundrisstyp zu klein. Dennoch sind augenscheinlich Unterschiede zu erkennen. So weisen die T-Typen deutlich höhere Maximaltemperaturen ($\Theta_{Max,T-Typ} = 33^\circ C$) und Standardabweichungen ($\sigma_{T-Typ} = 1.6^\circ C$) auf als die übrigen Zimmertypen ($\Theta_{Max,O-/I-Typ} = 29.5^\circ C$, $\sigma_{O-/I-Typ} = 1.3^\circ C$).

5.2. Ergebnisse der Messreihe Juli - Dezember 2011

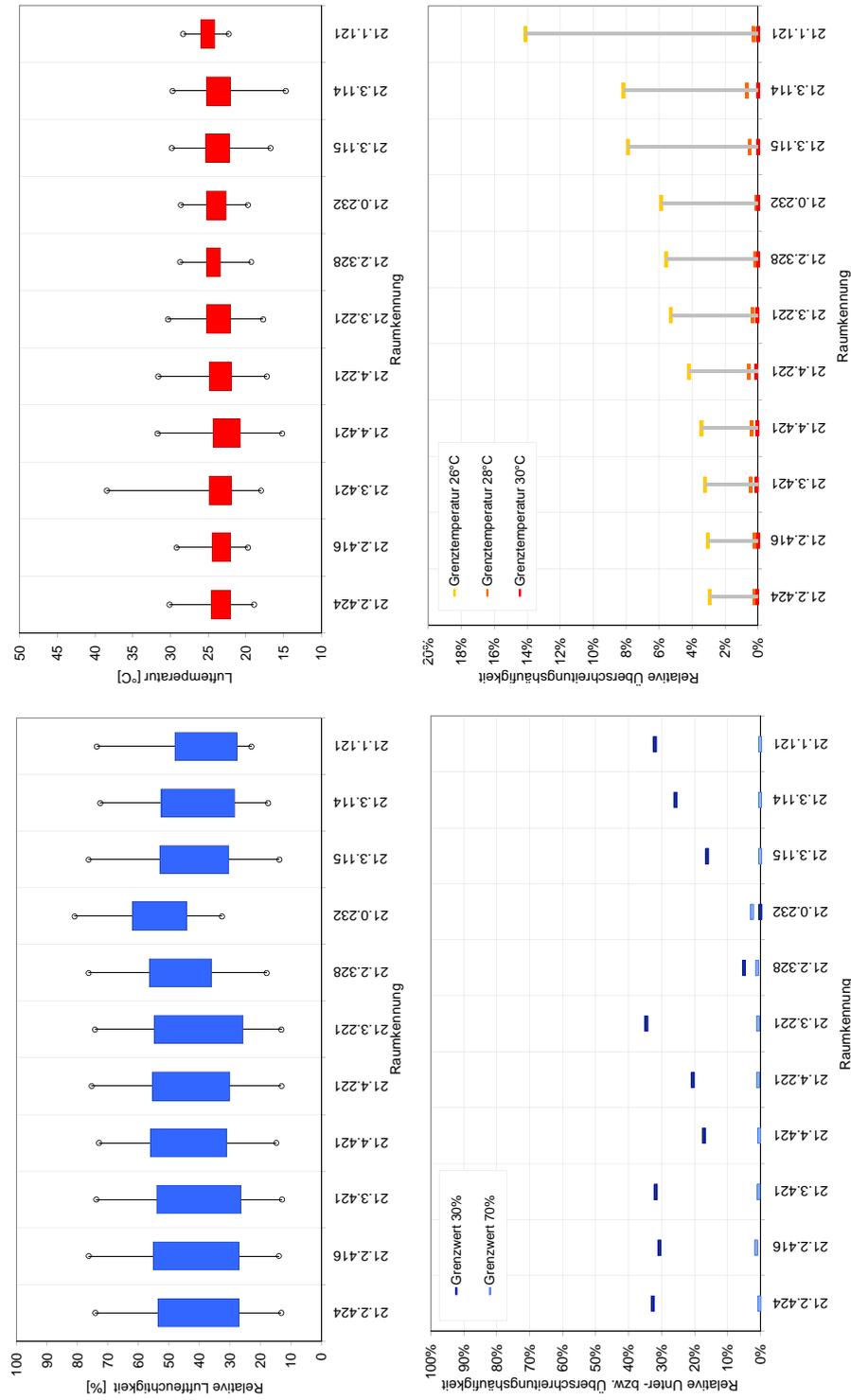


Abbildung 5.3.: Messdatenauswertung der Phase Juli bis Dezember 2011: Kastengrafik-Darstellung (Boxplot) sowie Häufigkeitsverteilungskennwerte der Lufttemperatur und Raumluftfeuchte in den Patientenzimmern. Die Kastengrafik-Darstellung geben nicht die Quartile sondern die Quartile sondern die Standardabweichung der Datenpunkte an. Die Räume sind gemäß der gemessenen Überschreitungshäufigkeit von 26°C sortiert.

5.3. Simulation einer Basisvariante

Nachfolgend soll für die vorgestellten Raumtypen der gemessene Raumklimaverlauf mit Gebäudesimulationsrechnungen nachvollzogen werden. Die Modellierung der geometrischen und bauphysikalischen Konstruktionseigenschaften ist auf Grund der umfassenden Gebäudedokumentation ohne Weiteres möglich.

Problematisch stellt sich die Modellierung der Nutzungsszenarien dar. Zu diesen Szenarien gehört das lokale Klima ebenso wie sämtliche Einflüsse, die der Nutzer des Bauwerks auf das Raumklima nimmt. Die nachfolgende Grafik (Abb. 5.4) enthält eine Dateneingabeübersicht mit einer farblichen Kennzeichnung dieser Unbekannten.

In einem ersten Simulationsansatz wurde der Klimadatensatz der Station Dresden-Klotzsche verwendet. Das Verhalten der Gebäudenutzer, insbesondere deren Anwesenheit und deren Lüftungsverhalten wurde auf Grundlage der Energiebedarfsprofile nach DIN 18599-10¹ angenommen. Für die Sonnenschutzsteuerung musste eine freie Annahme getroffen werden. Der Sonnenschutz wird in dieser Annahme ab einer Raumlufttemperatur von $\theta_{I,air} > 27^{\circ}C$ geschlossen.

Die Kennwerte des Raumlufttemperaturverlaufs der Messung und der Basissimulation sind in Abb. 5.5 für alle Zonen gegenübergestellt.

Der Vergleich der Datenreihenkenwerte offenbart größere Unterschiede in den Temperaturniveaus und -schwankungen. Das ist insbesondere aus der Häufigkeitsverteilung der Temperaturen zu schlussfolgern. Die Kennwerte der Simulation liegen demnach deutlich über den gemessenen Werten. Sowohl die Überschreitungshäufigkeiten als auch Mittelwerte und Standardabweichung werden vom Simulationsmodell stark überschätzt.

Es ist daraus zu schlussfolgern, dass die Randbedingungen der Simulationsrechnung stark von den realen Bedingungen abweichen. Für diese Abweichung kommen mehrere Ursachen in Frage. Eine Ursache sind die frei angenommenen Nutzungsbedingungen. So sind die Wärmelasten und der Luftwechsel der Energiebedarfsberechnungsnorm entnommen. Diese Profile spiegeln eher den typischen Heizperiodenfall als den Sommerfall wieder. Darüber hinaus wurde die Sonnenschutzsteuerung frei

¹Die angesetzten Bedingungen sind gemäß DIN 18599-10, Tabelle A.10 (Bettzimmer) ein Luftwechsel von $4 \frac{m^3}{m^2h}$ sowie eine permanente Wärmelast von $12 \frac{W}{m^2}$ aus Personen- und Gerätewärmeinträgen.

5.3. Simulation einer Basisvariante

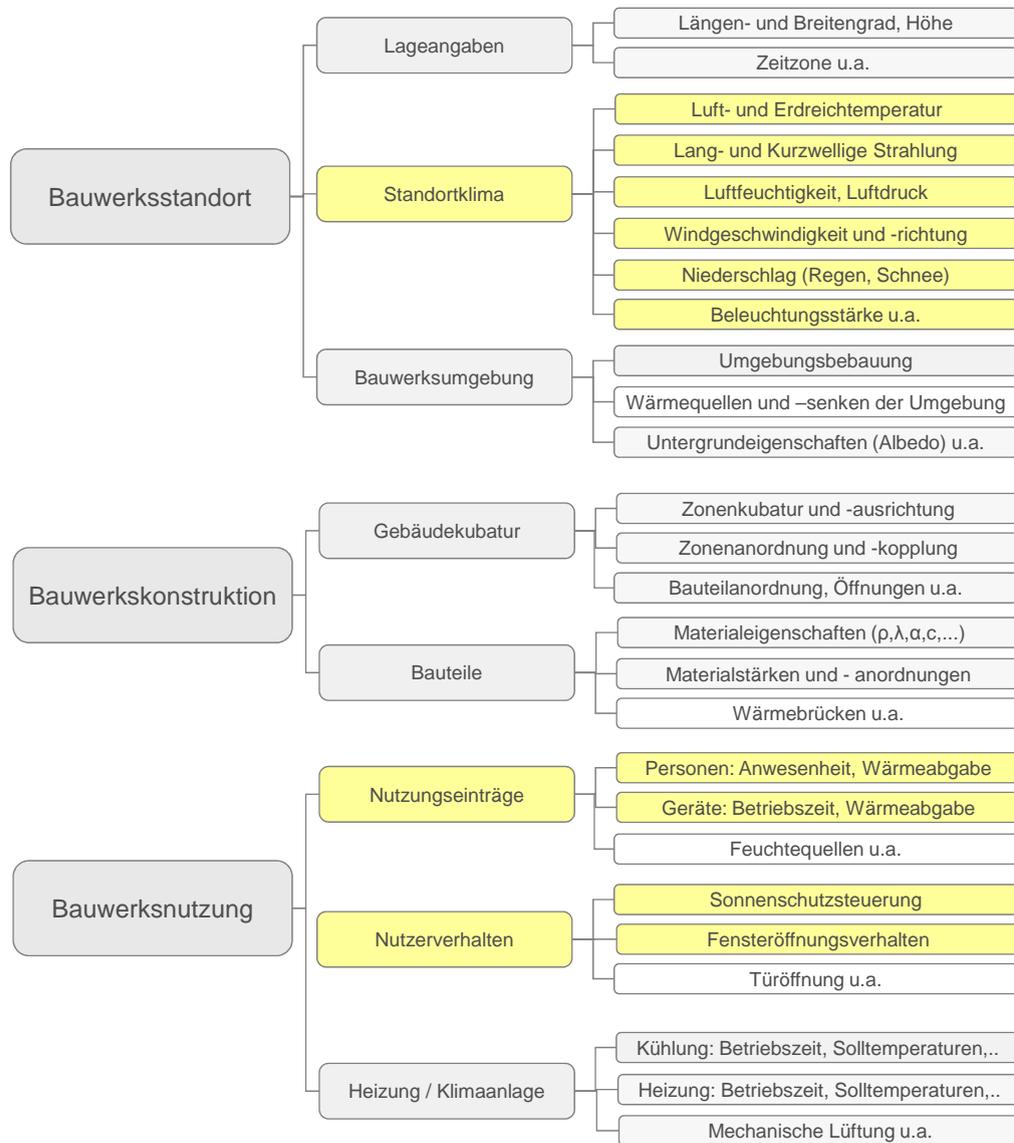


Abbildung 5.4.: Eingabedatenübersicht des Simulationsmodells. Die nicht vorhandenen Bedingungen bzw. Nutzungsprofile sind farblich gekennzeichnet.

festgelegt. Einen zusätzlichen Unsicherheitsfaktor stellt das Außenklima dar. Dieses wurde durch eine außerstädtische Klimamessstation erfasst (Flughafen Klotzsche). Es ist sehr wahrscheinlich, dass dieses Umfeldklima unter anderem geringere Lufttemperaturen und höhere Strahlungskennwerte aufweist und sich damit erheblich vom Stadtklima unterscheidet.

5. Entwicklung eines eigenen Kalibrierverfahrens

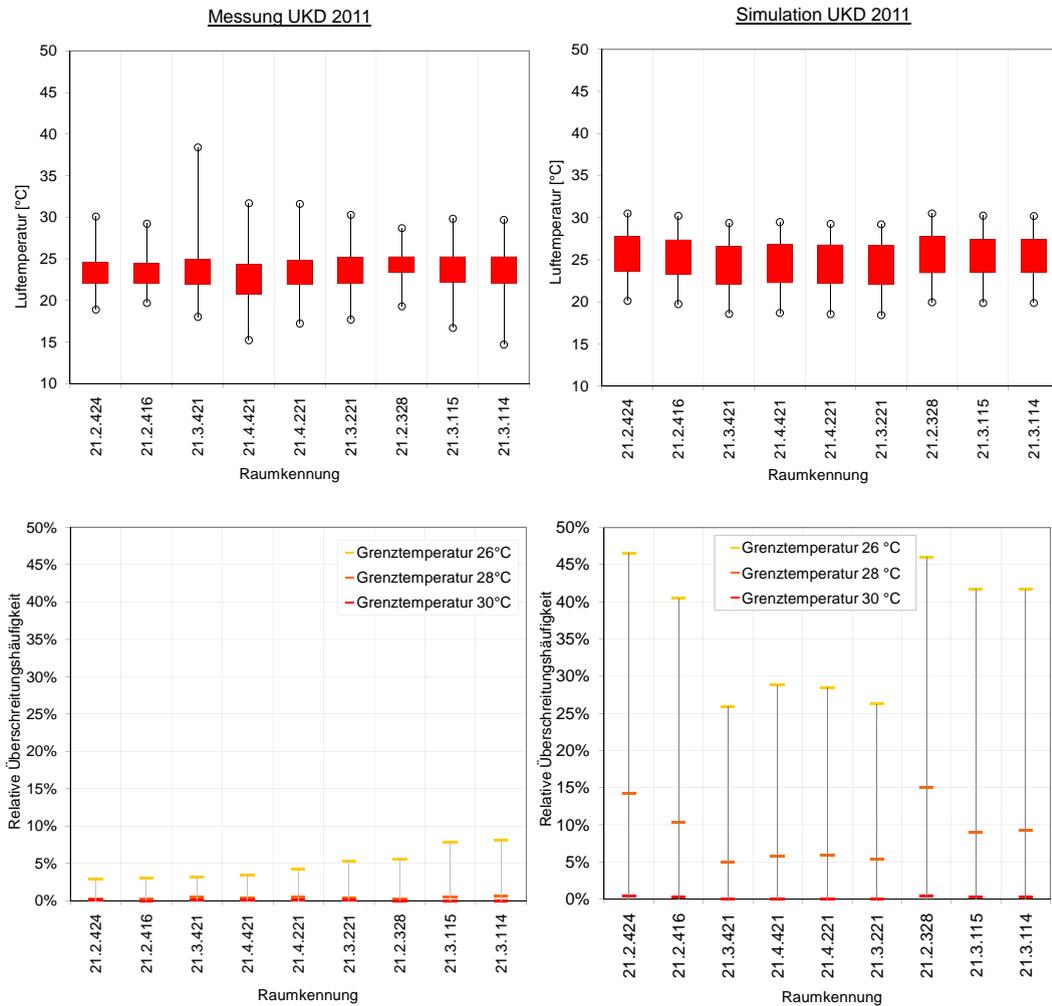


Abbildung 5.5.: Boxplot- Darstellung der Raumlufttemperaturkennwerte der Messung und der Basissimulation (oben) sowie Überschreitungshäufigkeit für drei verschiedene Lufttemperaturwerte (unten). In der Boxplot- Darstellung bildet die Box nicht die Quartile sondern die Standardabweichung ab. Raum 21.0.232 und 21.1.121 wurden nicht simuliert.

Nachfolgend werden theoretische Überlegungen und Messungen zur Eingrenzung des Standortklimas und der Nutzungsbedingungen hinzugezogen. Diese werden die Grundlage für eine Kalibrierung des Simulationsmodells bilden.

5.4. Ermittlung der lokalen Außenklimabedingungen

Zur Erfassung der lokalen stadtklimatischen Verhältnisse wurde eine Wettermessstation in der Nähe der untersuchten Bauten errichtet. Diese befindet sich auf dem Dach des Medizinisch- Theoretischen Zentrums des Universitätsklinikums Dresden auf der Blasewitzer Straße in Dresden. Die Messstation zeichnet dort seit 2011 das innerstädtische Außenklima auf.²

Die folgende Tabelle 5.2 zeigt am Beispiel des Monats Juli eine Übersicht der wichtigsten Kennwerte für die außerstädtische Station Dresden- Klotzsche und die innerstädtische Station Dresden- Johannstadt.³

Kennwert	DD- Johannstadt	DD-Klotzsche	Differenz
$\theta_{Luft,max}$	31,5°C	28,3°C	3,2 K
$\theta_{Luft,min}$	8,9°C	8,7°C	0,2 K
$\theta_{Luft,mittel}$	18,1°C	17,0°C	1,1 K
$t_{>26^{\circ}C}$	10,5 %	5,1 %	5,4 %
$t_{>30^{\circ}C}$	0,3 %	0,0 %	0,3 %
$Q_{glob,mittel}$	177,9 $\frac{W}{m^2}$	185,7 $\frac{W}{m^2}$	7,8 $\frac{W}{m^2}$
ϕ_{mittel}	66,9 %	74,3 %	7,4 %
x_{mittel}	10,1 $\frac{g}{kg}$	10,6 $\frac{g}{kg}$	0,5 $\frac{g}{kg}$
v_{mittel}	1,9 $\frac{m}{sek}$	4,0 $\frac{m}{sek}$	2,1 $\frac{m}{sek}$

Tabelle 5.2.: Vergleich der Klimaverhältnisse zwischen Dresden- Klotzsche und Dresden- Johannstadt am Beispiel des Monats Juli 2011.

Es ist aus dieser Übersicht zu erkennen, dass wesentliche Unterschiede zwischen Stadtklima und außerstädtischem Klima existieren. Die Lufttemperatur ist innerstädtisch durch permanent höhere Werte charakterisiert. Die kurzwellige Strahlung ist innerstädtisch leicht reduziert, ebenso das Feuchteniveau und die Windgeschwindigkeiten.

Auch im Tagesverlauf sind erhebliche Unterschiede zu erkennen. Am betreffenden

²Eine Beschreibung der erfassten Wetterelemente dieser Wetterstation befindet sich auf Seite XXIII.

³Einen ausführlichen Vergleich der mittleren Tagesverläufe für die Wetterelemente Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit absolut und relativ sowie Globalstrahlung enthalten die Abbildungen A.4 und A.5 auf S.XXVII. Ein Vergleich der langwelligen Himmelsgegenstrahlung war nicht möglich weil diese an der Station Dresden- Klotzsche nicht erfasst wird.

5. Entwicklung eines eigenen Kalibrierverfahrens

Standort treten die maximalen Differenzen nicht, wie zu vermuten, während der Nachtstunden, sondern während der Abendstunden auf. Die maximale Differenz beträgt für den Monat Juli im Mittel 2.8°C und stellt sich gegen 20 Uhr ein. Eine zweite Charakteristik besteht in der Verschiebung des städtischen Temperaturverlaufs gegenüber dem außerstädtischen Verlauf. Der morgendliche Aufheißungsvorgang beginnt innerstädtisch ein bis zwei Stunden später und erreicht sein Maximum ebenfalls mit dieser Verzögerung am Nachmittag. (siehe Abb. A.4, S. XXIX).

Die Messungen der Windgeschwindigkeiten übertreffen die zu erwartenden Unterschiede. Auf Grund der Nähe zum Elbtal konnte davon ausgegangen werden, dass die Luftgeschwindigkeiten in Stadtteil Johannstadt nur geringfügig reduziert sind. Die Messung ergibt hingegen für den Monat Juli eine Reduktion der mittleren Windgeschwindigkeit um 53 %.

Eine messbare Schwächung der kurzwelligen Strahlung durch städtische atmosphärische Verunreinigungen war lediglich bei niedrigem Sonnenstand (große relative Atmosphärenschichtdicke) zu erwarten. Aus den Messungen wurde ersichtlich, dass eine relevante Schwächung auch während des Sommers auftritt. Der Vergleich der Diffus- und Direktstrahlung (siehe Abb. A.6, S. XXIX) offenbart, dass diese Schwächung in erster Linie in einer Schwächung der Diffusstrahlung in der ersten Tageshälfte besteht. Darüber hinaus zeigt sich eine deutliche Verschiebung der Strahlungseinträge im Stadtgebiet. Das Diffusstrahlungsmaximum tritt etwa eine Stunde später als im Stadtumfeld auf und fällt gegenüber dem Umland geringer aus. Wahrscheinlich basiert dieser Umstand sowohl auf der Verschattungswirkung der städtischen Horizontbebauung als auch der Elbtalhänge.

Der Vergleich der absoluten Luftfeuchtigkeit zeigt nur geringe Veränderungen gegenüber dem Umfeld. Das kann eventuell auf die naheliegende Verdunstungsfläche der Elbe und auf den relativ großen Grünflächenanteil des Stadtgebietes zurückgehen. Die relative Luftfeuchtigkeit unterscheidet sich vor allem wegen des innerstädtisch höheren Temperaturniveaus vom Umfeld. (siehe Abb. A.5, S. XXVIII)

5.5. Ermittlung der Nutzungscharakteristik

Es war nicht möglich, das Nutzerverhalten einschließlich Sonnenschutzsteuerung, Fensteröffnung, Anwesenheit und Beleuchtungsbedienung während des betrachteten Zeitraums messtechnisch zu erfassen. Da das untersuchte Gebäude dem Nutzer all diese Einflüsse gewährt, stellen diese Bedingungen einen großen Unsicherheitsfaktor für die Simulation dar.

Im Folgenden werden für die unbekanntenen Nutzungscharakteristiken sowohl theoretische Überlegungen als auch praktische Erhebungen angeführt. Beides dient der Eingrenzung der Nutzungscharakteristik und der Erstellung möglicher Pläne bzw. Profile für das Nutzerverhalten.

5.5.1. Aktivierung & Deaktivierung des Sonnenschutzes

Zur Eingrenzung der Sonnenschutzaktivierung wurden mögliche Einflusskennwerte in einem Abhängigkeitsdiagramm zusammengetragen. Diese Kennwerte wurden in die Kennwerte einer automatisierten Sonnenschutzregelung und die Empfindungswerte der individuellen Bedienung durch Personen in den Räumen eingeteilt.

Im Falle einer zentralen Regelung und Steuerung kann der äußere Sonnenschutz in Abhängigkeit der installierten Sensorik und der damit vorhandenen Regelungsgrößen gesteuert werden. Als Einstellvarianten sind neben den Grundeinstellungen “an” und “aus” auch die Festlegungen von Öffnungsgraden (z.B. bei Raffstoren) und/oder Elementwinkeln (z.B. Lamellenwinkel bei Lamellenjalousien) möglich.

In der Regel wird für einstellbare äußere Sonnenschutzsysteme mindestens zur Gewährleistung des Frost-, Wind-, Regen- und Schneelastschutzes das Hochfahren sichergestellt. Die Grenzwerte für diese Schutzmechanismen sind vorwiegend von den statischen Gegebenheiten des Sonnenschutzes⁴ abhängig.

⁴Es existieren hierzu verschiedene Normen und Richtlinien, welche die Prüfverfahren und Anforderungen regeln, z.B. DIN EN 13659: “Abschlüsse außen und Außenjalousien – Leistungs- und Sicherheitsanforderungen”, Normenausschuss Bauwesen (NABau), Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth- Verlag GmbH Berlin, 2011. sowie DIN EN 18073: “Rollläden, Markisen, Rolltore und sonstige Abschlüsse im Bauwesen – Begriffe, Anforderungen”, Normenausschuss Bauwesen (NABau), Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth- Verlag GmbH Berlin, 2004.

5. Entwicklung eines eigenen Kalibrierverfahrens

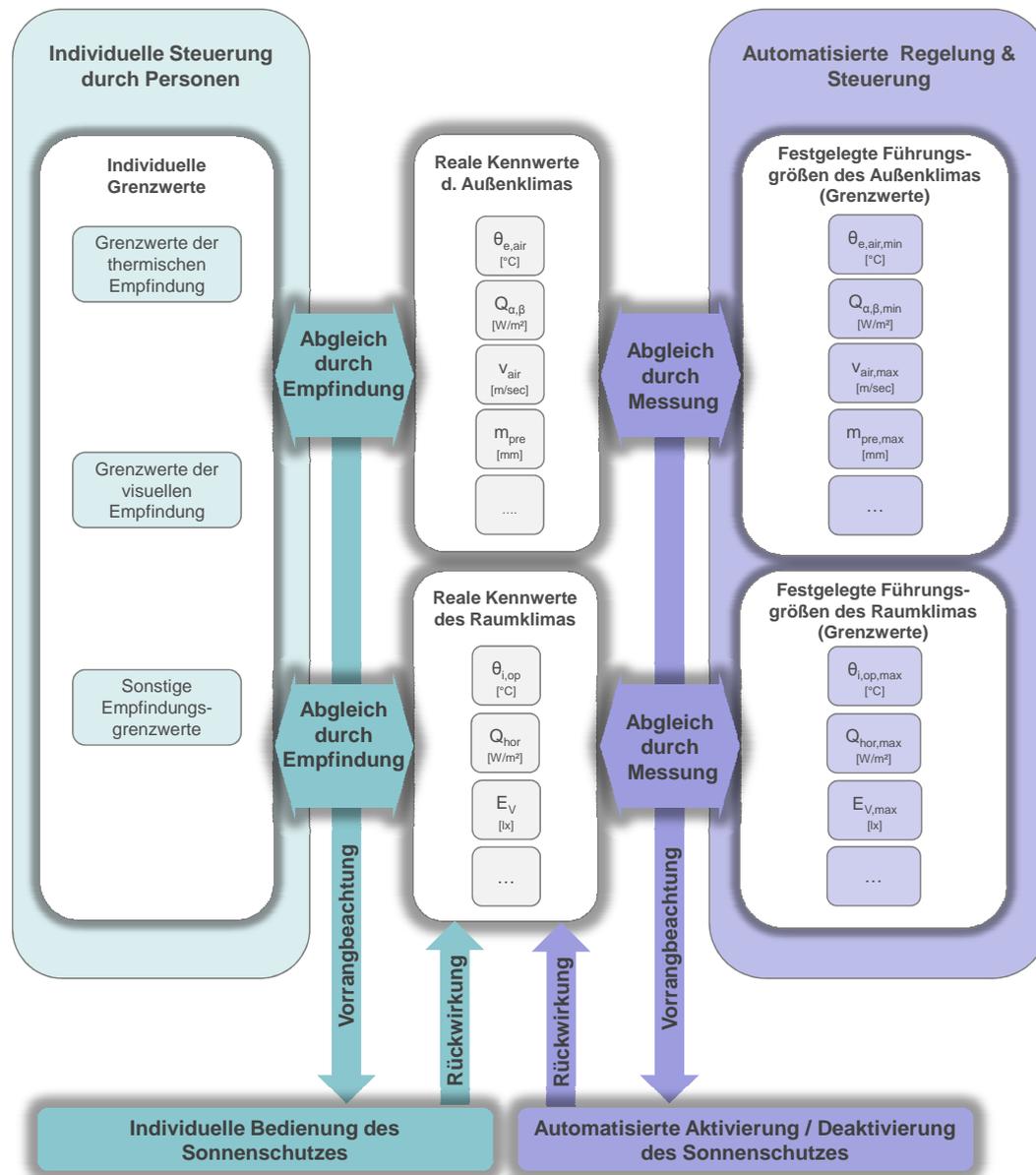


Abbildung 5.6.: Einflussfaktoren Sonnenschutzaktivierung.

Des Weiteren besteht die Möglichkeit, den Sonnenschutz in Abhängigkeit der Außenklimabedingungen zu steuern. Die Sensoren können zentral (Dach) oder an einzelnen Teilbereichen (z.B. je Himmelsrichtung) angebracht werden. Möglich sind hier unter anderem Sensoren zur Erfassung der Globalstrahlung auf eine Horizontalfäche Q_{hor} bzw. eine ausgerichtete Fläche $Q_{\alpha,\beta}$, Sensoren zur Erfassung der Außenluft-

temperatur $\theta_{e,air}$ oder der Beleuchtungsstärke E_A . Die Steuerung erfolgt meist in Abhängigkeit mehrerer Faktoren, z.B. zur Vermeidung einer Überhitzung bei Überschreitung eines Globalstrahlungsgrenzwertes bei gleichzeitiger Überschreitung eines Außenlufttemperaturgrenzwertes. Es ist ebenfalls eine Kombination mit Berechnungswerten sinnvoll. Beispielsweise kann für den Sommerlichen Wärmeschutz der Sonnenschutz runtergefahren werden, wenn der Sonneneinfallswinkel $\gamma_{\alpha,\beta}$ auf die jeweilige Fassade einen Grenzwert unterschreitet und gleichzeitig die Globalstrahlung einen Grenzwert überschreitet.

Ähnliche Steuerungsmethoden sind auch in Kombination mit raumseitig angebrachten Sensoren möglich. Hier sind insbesondere die raumseitigen Lufttemperaturen θ_{RL} und die Belichtungsverhältnisse, z.B. die Beleuchtungsstärke E_V von Interesse. So kann beispielsweise der Lamellenwinkel der Sonnenschutzsysteme in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke gesteuert werden.

Neben der technischen Steuerung und Regelung existiert die nutzerabhängige Steuerung. Diese kann sowohl den äußeren als auch den inneren Sonnenschutz betreffen. In beiden Fällen ist davon auszugehen, dass der Nutzer den Sonnenschutz in Abhängigkeit der thermischen und visuellen Empfindung steuert. So wird er beispielsweise bei Blendung (hohe Leuchtdichtedifferenzen) oder beim Auftreffen direkter Strahlung auf den Körper den Sonnenschutz aktivieren.

Für sämtliche Steuerungsvarianten sind Ein- bzw. Ausfahrverzögerung zu berücksichtigen. Diese geben an, wie lange eine Bedingung vorherrschen muss, damit der Sonnenschutz ein- bzw. ausgefahren wird. Wird diese Verzögerung nicht beachtet, so kommt es in der Praxis bei schnell wechselnden Regelungsgrößen zu einem häufigen Ein- und Ausfahren des Sonnenschutzes. Ein Beispiel hierfür wären wechselnde Bewölkungssituationen, d.h. Einstrahlungsleistungen.

Stichproben der Sonnenschutzsteuerung

Zur Eingrenzung des Sonnenschutzsteuerungsverhaltens wurde am betreffenden Gebäude eine Stichprobenuntersuchung durchgeführt. Über einen Sommertag hinweg wurde die Bedienung des Sonnenschutzes an den äußeren ost- und westausgerichteten Fassaden beobachtet. Dieser Tag wies Lufttemperaturen von über 30°C auf. Der vorhergehende Tag stellte sich ähnlich dar. Es war zu erwarten, dass der Sonnenschutz der beiden Fassaden dem Strahlungseintrag folgt. Die Übersicht des über

5. Entwicklung eines eigenen Kalibrierverfahrens

den Tagesverlauf im Stundenintervall abgeschätzten geschlossenen Flächenanteils enthalten die Abbildungen 5.8 und 5.7.

Es ist zu erkennen, dass der Sonnenschutz kaum im Tagesverlauf variiert. Möglicherweise ist er zu Tagesbeginn in Vorabendstellung belassen worden und wird, bis auf die Büroräume, nicht angepasst. Für die Zonen der Ostfassade zeigen sich noch geringere Unterschiede. Erstaunlicherweise ähnelt jedoch das gemittelte Profil dem der Westfassade, obwohl der Hauptstrahlungseintrag hier am Vormittag und nicht, wie auf der Westfassade, am Nachmittag stattfindet. Darüber hinaus ist zu resümieren, dass die Patientenzimmer in beiden Ausrichtungen eine sehr geringe Variation und einen hohen mittleren Verschattungsgrad aufweisen.

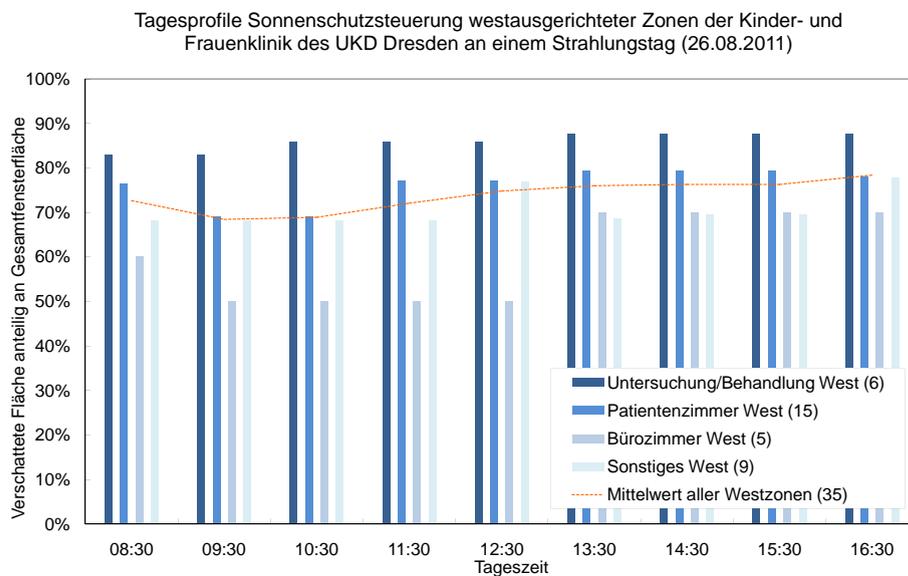


Abbildung 5.7.: Steuerung des Sonnenschutzes der äußeren Westfassade der Kinder- und Frauenklinik des Universitätsklinikums Dresden an einem Strahlungstag.

5.5. Ermittlung der Nutzungscharakteristik

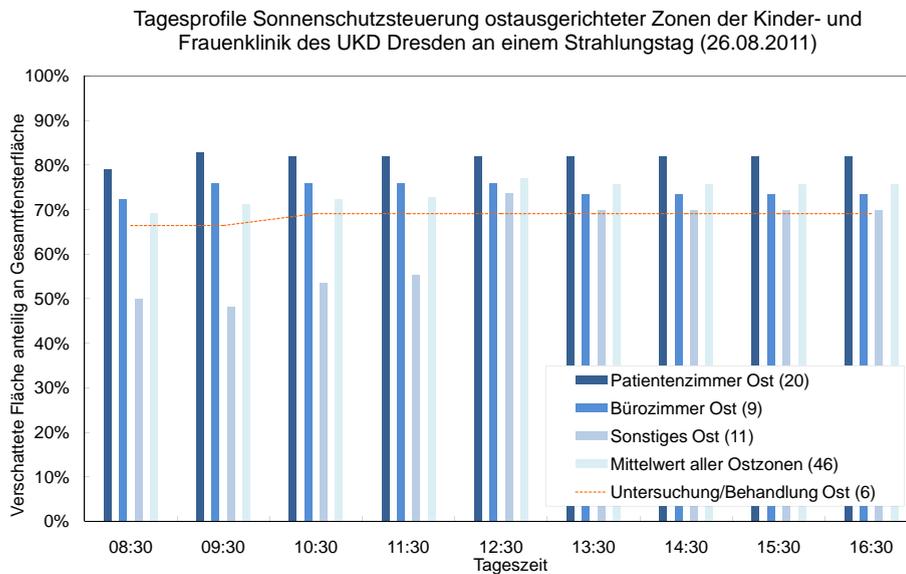


Abbildung 5.8.: Steuerung des Sonnenschutzes der äußeren Ostfassade der Kinder- und Frauenklinik des Universitätsklinikums Dresden an einem Strahlungstag.

5.5.2. Fensteröffnung

In vielen Fällen werden für die Berücksichtigung des Luftwechsels pauschale Luftwechselraten angenommen. Tatsächlich ist auch der sich einstellende Luftwechsel über Fensterlüftung von verschiedenen Faktoren abhängig. Die nachfolgende Übersicht unterteilt diese, ebenso wie für die Sonnenschutzsteuerung, in Regelungsgrößen einer automatisierten Fensteröffnung sowie Einflusskennwerte für die individuelle Steuerung durch Personen.

Ebenso wie die Sonnenschutzsteuerung kann die Fensteröffnungssteuerung von Außen- und Raumklimabedingungen abhängig sein. Im Falle einer zentralen Steuerung können als Regelungsgrößen neben den thermischen Kennwerten des Außen- und Raumklimas auch akustische und olfaktorische Kennwerte als Regelungsgrößen festgelegt werden.

Der tatsächliche Förderstrom über die Fenster (“natürliche Lüftung”) ergibt sich aus dem durch die Außen- und Raumklimabedingungen potenziell möglichen Luftwechsel und der vom Nutzer variierten bzw. durch das zentrale Steuerungssystem bewerkstelligten Öffnungsfläche.

5. Entwicklung eines eigenen Kalibrierverfahrens

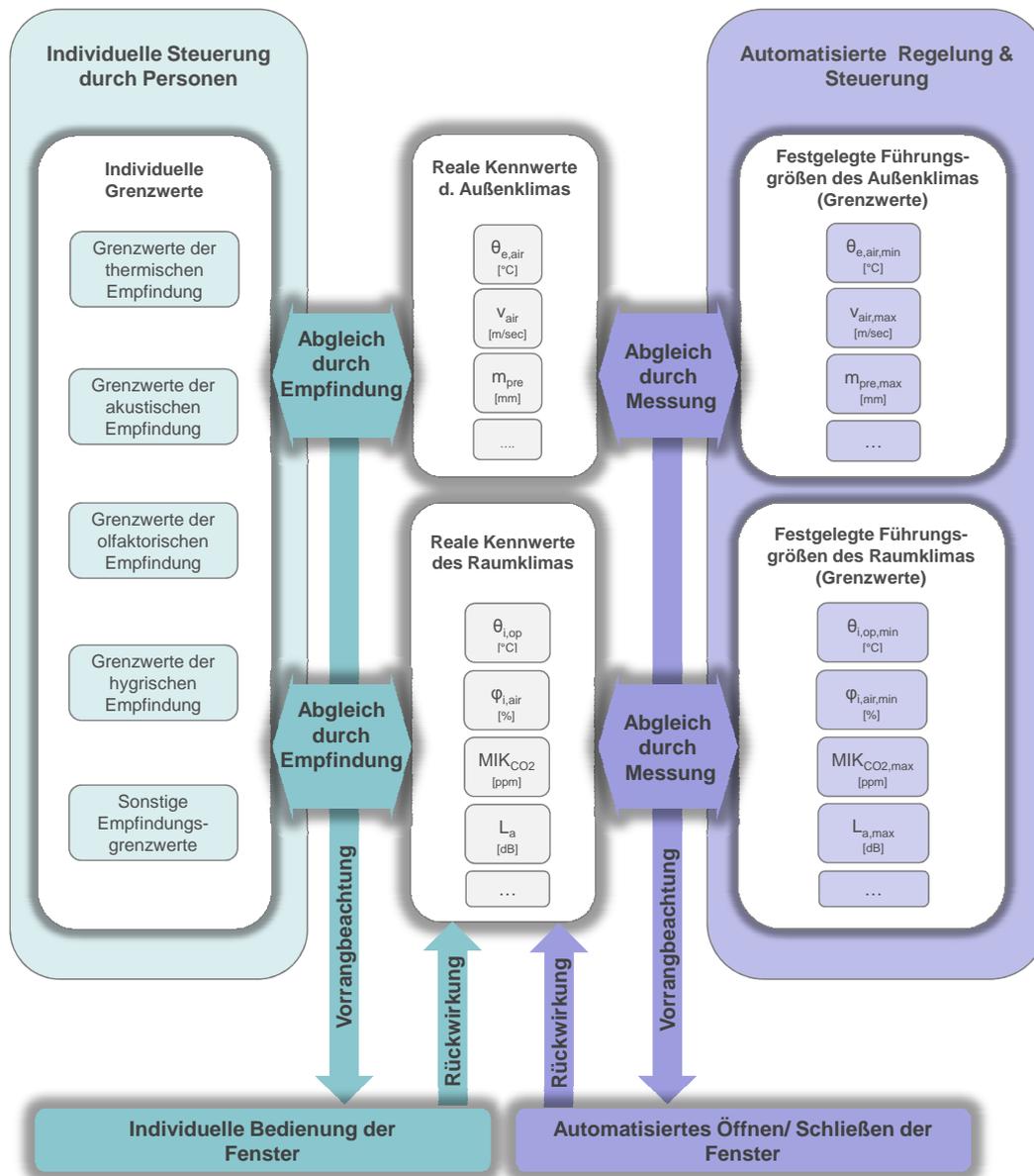


Abbildung 5.9.: Einflussfaktoren Fensteröffnung.

Der maximal mögliche Luftwechsel wird vor allem durch die Standortbesonderheiten und klimatischen Randbedingungen bestimmt. Er setzt sich aus einem Winddruck- und einem Auftriebsanteil zusammen. Der winddruckinduzierte Luftwechsel hängt von den Druckverhältnissen am Gebäude und damit maßgeblich von den lokalen Windverhältnissen, der Bebauungs- und Begrünungsstruktur der Umgebung, der Gebäudekubatur sowie der Lage des zu lüftenden Bereichs im Gebäude ab. Der

durch den thermischen Auftrieb induzierte Luftwechsel ist ebenso von der Gebäudekubatur, insbesondere der Höhe, sowie von den Temperaturverhältnissen im Außen- und im Innenraum abhängig.

Die Öffnungsfläche ist von den bautechnischen Voraussetzungen und andererseits von Steuerungsverhalten abhängig. Je nach Konstruktionsvariante⁵ der Fenster ist eine maximale effektive Öffnungsfläche erzielbar. In der Regel werden Dreh- und Kippstellung gewährleistet. Welcher minimale Luftwechsel im geschlossenen Zustand möglich ist, wird über die Durchlässigkeit der Fugen angegeben.

Die tatsächliche effektive Fensteröffnungsfläche ist bei freier Lüftungskonzeption dem Gebäudenutzer überlassen. Es ist anzunehmen, dass diese Steuerung ebenso wie die Sonnenschutzsteuerung von der empfundenen Behaglichkeit, d.h. in diesem Fall dem thermischen und gegebenenfalls auch akustischen und olfaktorischen Komfort, abhängig ist. Darüber hinaus gibt es beschränkende Faktoren, z.B. hohe Windgeschwindigkeiten oder starker Regen, bei denen die Fenster nicht geöffnet werden können.

Stichproben Fensteröffnung

Ebenso wie die Sonnenschutzsteuerung wurde die Fensteröffnung über den gewählten Tag hinweg stündlich abgeschätzt. Die nach Ausrichtung geordneten Beobachtungsergebnisse enthalten die Abbildungen 5.10 und 5.11.

Im Gegensatz zur Bedienung des Sonnenschutzes unterscheiden sich beide Ausrichtungen merklich. Die Zonen in Ostausrichtung werden im Tagesmittel stärker gelüftet als die Zonen in Westausrichtung. Für beide Ausrichtungen ist jedoch eine geringe Tagesvariation festzustellen. Im Mittel kann von einer permanenten Kippstellung der Fenster ausgegangen werden. Lediglich in den Büroräumen findet verstärkte Lüftung am Vormittag statt. Die Patientenzimmer erweisen sich als die Zonen mit dem geringsten Öffnungsgrad und dem stetigsten Öffnungsanteil der Fläche.

⁵Damit ist der Öffnungsmechanismus gemeint, z.B. Kippfenster, Drehfenster, Stulpfenster, Parallel- oder Hebeschiebefenster etc.

5. Entwicklung eines eigenen Kalibrierverfahrens

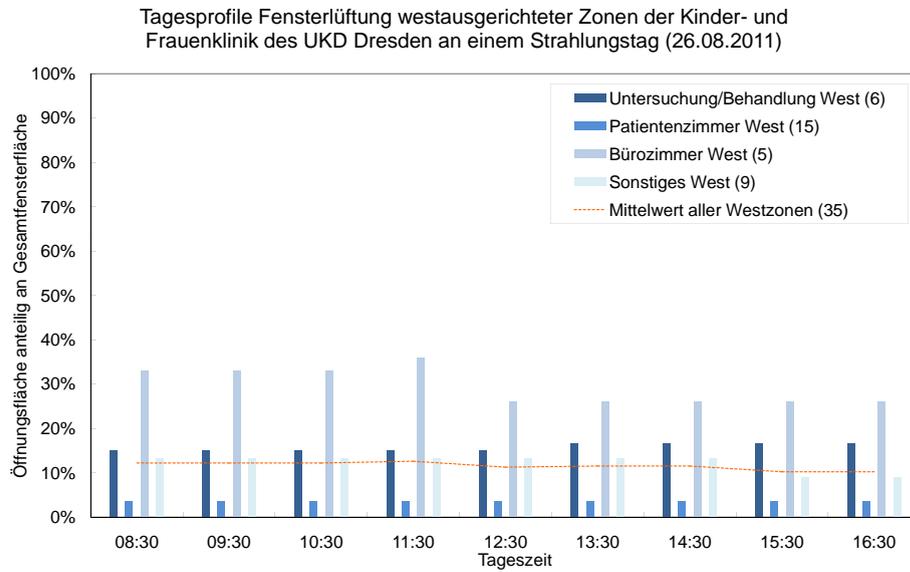


Abbildung 5.10.: Fensteröffnung der äußeren Westfassade der Kinder- und Frauenklinik des Universitätsklinikums Dresden an einem Strahlungstag (28.08.2011)

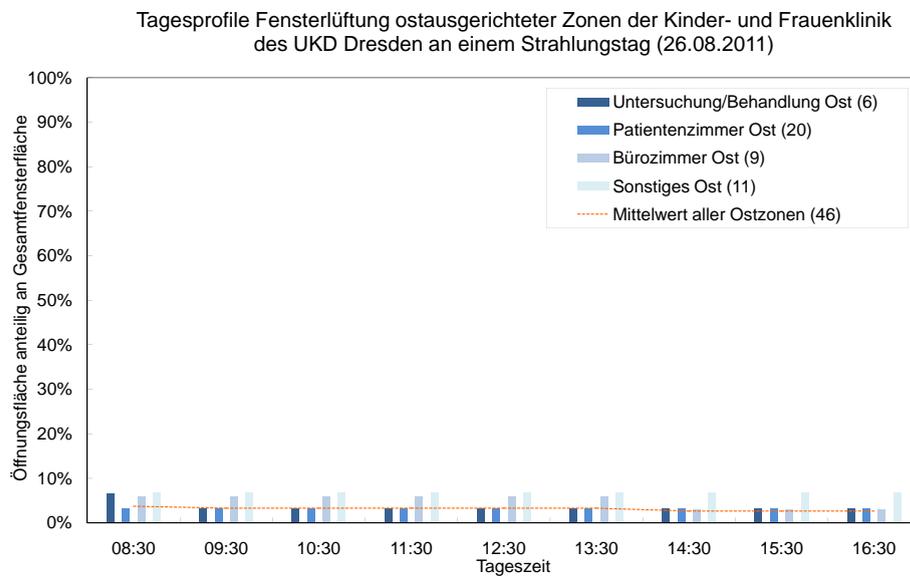


Abbildung 5.11.: Fensteröffnung der äußeren Ostfassade der Kinder- und Frauenklinik des Universitätsklinikums Dresden an einem Strahlungstag (28.08.2011)

5.5.3. Interne Wärmelasten

Innere Wärmelasten durch Personen, technische Geräte und Beleuchtung folgen ebenfalls zentralen Festlegungen, z.B. Nutzungsart oder Arbeitszeiten, sowie individuellen Rahmenbedingungen. Sie können in technisch bedingte Wärmelasten (Beleuchtung, technische Ausstattung) und personenbedingte Wärmelasten unterteilt werden.

Der Anteil der technisch bedingten Wärmelasten ergibt sich aus den potenziell möglichen Emissionen der technischen Ausstattung und deren praktischer Nutzung. Für die potenzielle Wärmeabgabe kann vereinfachend die Anschlussleistung der Geräte angenommen werden.

Die Personenlasten sind ebenso von der potenziellen Wärmeabgabe (Gesamtgrundumsatz) der Person sowie von deren praktischer Tätigkeit abhängig. Wie aus Kapitel 6 hervorgeht, ist der Gesamtgrundumsatz⁶ bei Kindern auf Grund der geringeren Körpermasse gegenüber Erwachsenen reduziert. Ältere Personen hingegen weisen eine geringere Stoffwechselaktivität und daher gegenüber jüngeren Erwachsenen einen geringeren Gesamtgrundumsatz auf. Der Leistungsumsatz ergibt sich einerseits aus der vorgegebenen Tätigkeit (z.B. ruhender Patient) und andererseits aus individuellen Faktoren (z.B. eingeschränkter Leistungsumsatz durch schlechten Gesundheitszustand, schlechte Konstitution).

Erfragte Belegungszeiten

Zur Abschätzung der personen- und ausstattungsbedingten Wärmelasten wurden die Angaben des jeweiligen Stationspersonals hinzugezogen. Grundsätzlich ist von einer konstanten Nutzung auszugehen, da sich die Patienten nahezu ganztägig im Patientenzimmer aufhalten. Lediglich die Mahlzeiten, die Arztvisiten und Besuchszeiten könnten zu einem erhöhten Wärme- und Feuchteeintrag in den Räumen führen.

Diese Zeiten werden auf jeder Station unterschiedlich gehandhabt. Eine restriktive Festlegung der Besuchszeiten ist, insbesondere für Kinderstationen, unpraktikabel. Auf den betreffenden Stationen beschränken sich die Vorgaben auf eine Eingrenzung

⁶Damit ist der Grundumsatz pro Person, d.h. nicht der Grundumsatz pro Einheit der Körperoberfläche, gemeint.

5. Entwicklung eines eigenen Kalibrierverfahrens

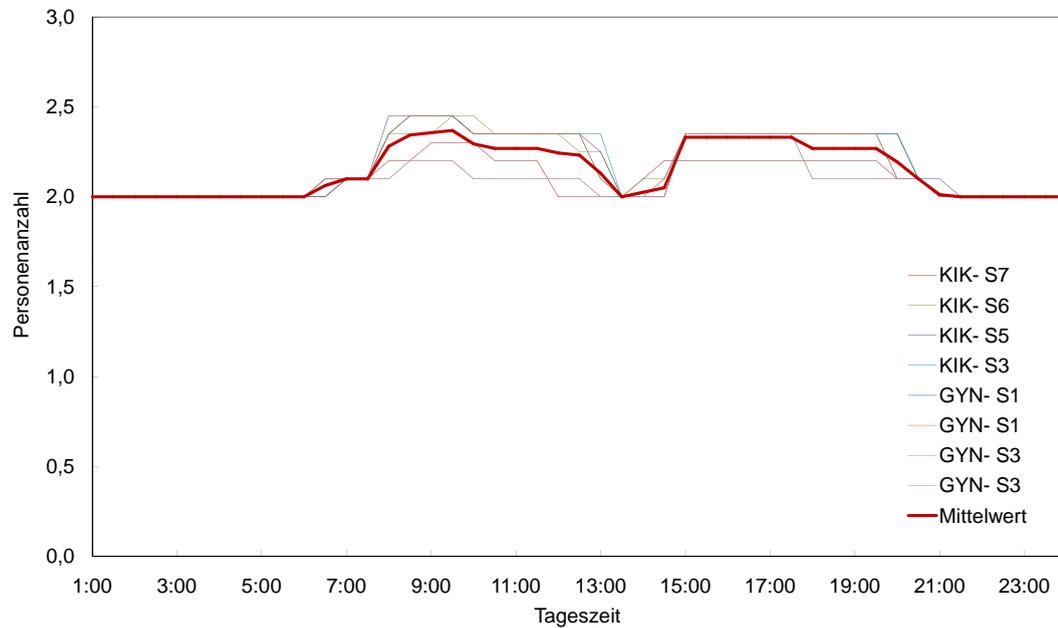


Abbildung 5.12.: Geschätzte Anzahl der sich im Raum aufhaltenden Personen im Tagesverlauf. Die Profile wurden aus den Angaben zu Besuchszeiten, Dienstübergabezeiten, Arztvisitezeiten und Mittagsruhezeiten der angegebenen Stationen abgeleitet.

der Mittags- und Nachtruhezeiten. Begehungen durch das medizinische und das Pflegepersonal sind meist sehr kurz oder nur an ausgewählten Wochentagen vorgesehen, so dass nicht mit merklichen Auswirkungen auf das Raumklima zu rechnen ist.

5.6. Bekannte Kalibrierverfahren

Da die Datenlage zur Ermittlung der vollständigen Nutzungsprofile nicht ausreichend ist, wird im Folgenden ein Ansatz aus der Kalibrierung von Gebäudesimulationsmodellen dafür verwendet, die unbekanntes Nutzungsprofile⁷ zu ermitteln.

Als Kalibrierung wird im Anwendungsfeld der Gebäudesimulation eine Vorgehensweise verstanden, welche der Ermittlung und Beseitigung von Abweichungen eines simulierten Datensatzes (Simulationsmodell) vom Referenzdatensatz (Messung, Referenzmodell) dient. Im Gegensatz dazu dient die Validierung der Bestätigung von Qualitätskriterien der Simulationsergebnisse. Eine Validierung muss weder eine Ermittlung der Abweichungen zwischen Referenzdatensatz und simuliertem Datensatz, noch deren Bewertung oder Reduktion beinhalten. [Potter u. a., 2007, S. 155 ff.]

Die Bewertung des Gebäudesimulationsmodells wird in beiden Fällen, der Kalibrierung und der Validierung, an Hand eines Abgleichs zwischen Gebäudesimulations- und Referenzdaten vorgenommen. Im besten Falle handelt es sich bei diesen Referenzdaten um vollständige Messdatenreihen unter bekannten Randbedingungen. Ein Abgleich mit anderen Simulationsergebnissen ist auch möglich. Beim Abgleich treten Differenzen zwischen den Datenreihen auf, welche unterschiedlichen Ursprungs sein können. Neben Fehlern in den Modelleigenschaften, z.B. durch Eingabe- und Dokumentationsfehler, können dies Programmierfehler, Modellvereinfachungen oder Unterschiede in den Lösungsverfahren (Numerik) sein. Für den Anwender der Gebäudesimulationsprogramme sind die letzten drei Fehlerquellen im Kalibrierprozess irrelevant⁸, bestimmen aber die erzielbare Genauigkeit des Simulationsmodells. Im Rahmen des Kalibrierprozesses seitens der Anwender von Gebäudesimulationsprogrammen werden insbesondere die Fehler in den Modelleigenschaften identifiziert und reduziert.

Das Problem der Kalibrierung von Gebäudesimulationsmodellen besteht dabei in deren Komplexität. In vielen Fällen sind mehrere Abweichungsursachen, darunter

⁷ Als Nutzungsprofile sind in diesem Zusammenhang jene Randbedingungen der Simulationsmodelle gemeint, welche das Verhalten von Personen im Gebäude abbilden. Dazu gehören beispielsweise die Wärmeabgabe, das Fensteröffnungsverhalten oder die Sonnenschutzbedienung durch Personen.

⁸ Etwaige Programmierfehler können durch den Anwender schwer identifiziert und nicht behoben werden. Gleiches gilt für Vereinfachungen in den physikalischen Modellansätzen und für die numerischen Lösungsansätze. Lediglich der letzte Punkt kann vom Anwender gegebenenfalls durch Anpassung von Parametern, z.B. Konvergenzkriterien, auf ein Mindestmaß reduziert werden.

5. Entwicklung eines eigenen Kalibrierverfahrens

auch unbekannte Kennwerte der Bauwerkseigenschaften, der Nutzungsart, des Außenklimas usw. vorhanden. Unter diesen Eingabekennwerten bestehen verzweigte Abhängigkeiten zum Simulationsergebnis. Die eindeutige Identifikation dieser Eingabekennwerte ist daher selten möglich. Es müssen systematische, wiederholbare Prozeduren angewandt werden, welche auf plausiblen Vereinfachungen beruhen. Die langhin praktizierte manuelle Parameteranpassung ist hier keine Option, da sie zu schwer reproduzierbaren und damit zweifelhaften Ergebnissen führt. [Reddy, 2005]

Ein Beispiel für eine systematische und reproduzierbare Vorgehensweise zur Kalibrierung von Gebäudesimulationsmodellen stellt das im Rahmen des ASHRAE-Forschungsprojektes RP-1051 erarbeitete Verfahren⁹ der Autoren Reddy und Sun dar. Die Kalibrierung wird darin als mathematisches Optimierungsproblem aufgefasst. [Reddy, 2005] [Sun u. Reddy, 2006] Dieses Kalibrierverfahren kann mit Hilfe eines generischen Optimierungsprogramms durchgeführt und an das Simulationsprogramm gekoppelt werden. Ein solches Tool ist GenOpt [Simulation Research Group, 2011]. Dieses Tool bzw. dieser Ansatz wird vor allem zur Kalibrierung von Energieverbrauchskennwerten propagiert. Dass dessen Anwendung auch für die Kalibrierung von Zeitreihen der Raumlufttemperatur und nicht nur Periodenkennwerten des Energieverbrauchs möglich ist, haben die Autoren Tahmasebi und Mahdavi gezeigt. [Tahmasebi u. Mahdavi, 2012]

Die Übertragung dieses Verfahrens auf die Ermittlung unbekannter Nutzungsprofile scheidet an zwei Verfahrensvoraussetzungen. Erstens basiert das Verfahren auf kontinuierlichen Wertvariationen der zu untersuchenden Parameter. Nutzungsprofile enthalten hingegen auch diskrete Werte, z.B. 0(aus) und 1(an). Zweitens besteht der Kern des Verfahrens in der Zufallsvariation eines, für das gesamte Betrachtungsintervall, konstanten Wertes. Nutzungsprofile bestehen demgegenüber aus Wertereihen. In der Regel sind dies Stundenwerte für ein Jahr.

⁹Dieser Ansatz wird im Anhang auf Seite XXXVII näher erläutert.

5.7. Eigener Kalibrieransatz zur Ermittlung von Nutzungsprofilen

Im zuvor erwähnten Kalibrierverfahren liegt der Schwerpunkt auf der Ermittlung eines unbekanntes Einzelkennwertes. Das Gütekriterium für das Ergebnis des Kalibrierprozesses, d.h. die Optimierungsfunktion, basiert in der Regel ebenfalls auf einem Einzelkennwert (Energiebedarfskennwert). Dieses Gütekriterium ist im Regelfall die Minimierung der absoluten Abweichung zwischen dem simulierten und dem gemessenen Einzelkennwert. Im Gegensatz dazu liegt der Schwerpunkt bei der Ermittlung realistischer Nutzungsprofile auf einer Maximierung der Verlaufsübereinstimmung zwischen simulierter und gemessener Datenreihe. Das Gütekriterium eines solchen Kalibrierverfahrens muss daher ein Kennwert sein, welcher die Übereinstimmung zwischen beiden Datenreihen, den gemessenen Zeitwerten und den simulierten Zeitwerten, hinreichend charakterisiert. Ein solcher Übereinstimmungskennwert ist ein Korrelationskoeffizient.

Im vorliegenden Ansatz wurde hierfür der lineare Korrelationskoeffizient zwischen Mess- und Simulationsreihe nach Pearson, $\sigma_{Pearson}$, gewählt. [Schönwiese, 2006, S. 163 ff.]

$$\sigma_{Pearson} = \frac{\sum_{i=1}^t (\Delta\theta_{i,sim} \cdot \Delta\theta_{i,meas})}{\sqrt{\sum_{i=1}^t (\Delta\theta_{i,sim})^2 \cdot \sum_{i=1}^t (\Delta\theta_{i,meas})^2}} \quad (5.1)$$

Dieser Koeffizient beschreibt unter definierten Randbedingungen¹⁰ die Übereinstimmung zweier Kollektive (Datenreihen). Im nachfolgenden Verfahren sind diese Datenreihen die gemessene (θ_{meas}) und die simulierte (θ_{sim}) Raumlufttemperatur. Die Werte $\Delta\theta_i$ geben darin die Abweichung zum Erwartungswert, d.h. die Abweichung zwischen dem Wert zum Zeitpunkt i (θ_i) und dem arithmetischen Mittel der Datenreihe (θ_{av}) an. Geht der Kennwert M gegen 1, so stimmen beide Temperaturverläufe vollständig überein. Geht der Wert gegen 0, so besteht kein Zusammenhang.

¹⁰Diese Voraussetzungen sind (1) eine lineare Abhängigkeit zwischen beiden Datenreihen, (2) eine Gauss-Verteilung der Kollektivwerte und (3) eine Datenunabhängigkeit innerhalb der Kollektive. [Schönwiese, 2006, S. 163 ff.] Die erste Voraussetzung ist dadurch erfüllt, dass es sich im durchgeführten Vergleich um den gleichen Datentyp, die Raumlufttemperatur, handelt. Der zweite Punkt ist erfüllt, solange sich die Raumlufttemperatur frei einstellen kann, d.h. keine Modifikation bestimmter Temperaturbereiche, z.B. durch Beheizung, erfolgt. Der letzte Punkt ist auf Grund der unabhängigen Datenquellen (Messung, Simulation) gegeben.

5. Entwicklung eines eigenen Kalibrierverfahrens

Die Vorgehensweise gängiger Kalibrierverfahren besteht nun darin, aus der Vielzahl von Kombinationen für die unbekanntes Eingangskennwerte jene Kombination zu identifizieren, welche das gewählte Gütekriterium, in diesem Fall die Korrelation zwischen Mess- und Simulationsdatensatz, am besten erfüllt. Die Anzahl der zu untersuchenden Kombinationen ist dabei sehr groß. Sie steigt exponentiell mit der zu untersuchenden Eingangsparameter- und Variantenanzahl. Zudem muss bei Einzelkennwerten davon ausgegangen werden, dass viele Parameterkombinationen zu dem gleichen Ergebnis führen. Daher besteht der erste Schritt dieser Kalibrieransätze in einer Eingrenzung der zu untersuchenden Parameter und ihrer Wertebereiche. Es wird davon ausgegangen, dass eher eine geringe Abweichung der einflussreicheren Parameter vom Referenzwert¹¹ zu realistischen Ergebnissen führt als eine starke Abweichung der weniger einflussreichen Kennwerte. Zu diesem Zweck wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Diese zielt darauf ab, einflussreiche von weniger einflussreichen Parametern zu unterscheiden und folglich die Anzahl der zu untersuchenden Parameter zu reduzieren. Mit den einflussreichen Kennwerten werden schließlich in unterschiedlichen Detaillierungsstufen alle möglichen Wertekombinationen simuliert und in Hinsicht auf das gewählte Gütekriterium ausgewertet. [Reddy, 2005] [Sun u. Reddy, 2006]

Im vorliegenden Ansatz ist eine andere Vorgehensweise gewählt worden. Da es sich bei Nutzungsprofilen um Zeitreihen und bei dem gewählten Gütekriterium um einen Zeitreihenkenwert handelt, wurde angenommen, dass die Auswirkung jeder einzelnen Variante auf das Gütekriterium, im Gegensatz zu Einzelparametern, eindeutig ist. Demnach könnte, jeweils für einen Profiltyp, das realistischste Profil aus einer Vielzahl von Varianten eindeutig identifiziert werden. Für das Zusammenwirken mehrerer Profilvarianten wurde, ebenso wie bei den gängigen Kalibrierverfahren, angenommen, dass eher die einflussreichen Kennwerte bzw. Profiltypen ergebnisbestimmend sind. Daher erfolgt die Ermittlung des jeweils realistischsten Profils eines Profiltyps in der Reihenfolge ihres Einflussmaßes auf das Simulationsergebnis. Dieses Einflussmaß wird ebenfalls mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse, d.h. über einen Sensitivitätskoeffizienten bestimmt.

Im Allgemeinen beschreibt der Sensitivitätskoeffizient SC , wie empfindlich eine Ausgabegröße A (Ergebniskennwert Gebäudesimulation) auf eine Änderung der Eingangsgröße E (unbekannte bzw. unsichere Eingangsparameter des Simulationsmodells) reagiert. Der Sensitivitätskoeffizient wird bei der Kalibrierung von Gebäudesi-

¹¹Mit Referenzwert ist hier die erste Wertannahme für den jeweils unbekanntes Kennwert gemeint.

5.7. Eigener Kalibrieransatz zur Ermittlung von Nutzungsprofilen

mulationsmodellen in der Regel mittels Finite- Differenzen- Methode und entweder in einem individuellen¹² oder in einem gesamtheitlichen Ansatz¹³ ermittelt. [Sun u. Reddy, 2006, S. 181]

$$SC_{abs} = \frac{\delta A}{\delta E} = \frac{\Delta A}{\Delta E} = \frac{(A_n - A_{n+x})}{(E_n - E_{n+x})} \quad (5.2)$$

Um eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Eingangsgrößen zu gewährleisten wird der Sensitivitätskoeffizient meist normiert, d.h. es wird eine prozentuale Änderung der Ausgabegröße in Bezug auf deren Referenzwert (A_{Ref}) im Verhältnis zur prozentualen Änderung der Eingangsgröße in Bezug auf deren Referenzwert (E_{Ref}) gesetzt.

$$SC_{norm} = \frac{\left(\frac{\Delta A}{A_{Ref}}\right)}{\left(\frac{\Delta E}{E_{Ref}}\right)} = \frac{\left(\frac{A_n - A_{n+x}}{A_{Ref}}\right) \cdot 100\%}{\left(\frac{E_n - E_{n+x}}{E_{Ref}}\right) \cdot 100\%} \quad (5.3)$$

Da im vorliegenden Ansatz Datenreihen (Stundenwerte der Nutzungsprofile für ein Jahr¹⁴) untersucht werden, kann für die Änderung der Eingangsgröße keine absolute Differenz angegeben werden. Der Sensitivitätskoeffizient wurde aus diesem Grund über eine Minimal- Maximalwert- Abschätzung ermittelt. Dafür wurde angenommen, dass jene Zeitreihen, welche die stärkste Amplitude im Jahresverlauf der Raumlufttemperatur verursachen auch den größten Einfluss auf die Korrelation zwischen gemessenem und simuliertem Jahresverlauf der Raumlufttemperatur, d.h. das Gütekriterium, nehmen. Als Kennwert für die mittlere Jahresamplitude ist die Standardabweichung der Raumlufttemperatur gewählt worden. Dieser Wert entspricht damit der Ausgabegröße. Die normierte Änderung dieser Ausgabegröße ist die prozentuale Abweichung zwischen der für das jeweilige Nutzungsprofil (Maximalvarianten) simulierten Standardabweichung zur Standardabweichung der Basissimulation (Minimalvariante). Die Änderung der Eingangsgröße entspräche der normierten Abwei-

¹²Der individuelle Sensitivitätskoeffizient beschreibt die Sensitivität der Ausgabegröße in Bezug auf die Veränderlichkeit einer individuellen Eingabegröße.[Sun u. Reddy, 2006, Gleichung 5]

¹³Der gesamtheitliche Sensitivitätskoeffizient beschreibt die Sensitivität der Ausgabegröße in Bezug auf die Veränderlichkeit aller Eingabegrößen.[Sun u. Reddy, 2006, Gleichung 6]

¹⁴Um welche Art von Stundenwerten es sich dabei handelt, hängt vor allem von der verwendeten Simulationssoftware ab. So kann es sich beispielsweise bei der Abbildung der Lüftungsprofile um Stundenwerte der Förderströme, der Luftwechsellraten oder der Öffnungsflächen handeln. Mögliche Profilarten werden im folgenden Abschnitt an Hand eines Beispiels aufgeführt.

5. Entwicklung eines eigenen Kalibrierverfahrens

chung zwischen Minimal- und Maximalvariante des jeweiligen Nutzungsprofils. Da die Nutzungsprofile jedoch nicht als Einzelkennwerte ausgedrückt werden können, wurde dieser Term mit Eins gleich gesetzt. Damit entspricht der Sensitivitätskoeffizient im vorliegenden Ansatz der normierten Abweichung der Ausgabengröße, d.h. der Standardabweichung des simulierten Jahresprofils der Raumlufttemperatur, zwischen Minimal- und Maximalvariante. Die Minimalvariante ist jene Variante eines Nutzungsprofils, welche die geringste Auswirkung auf die Standardabweichung der simulierten Raumlufttemperatur aufweist. Die Maximalvariante ist entsprechend die Variante mit der größten Auswirkung auf die Standardabweichung.

$$SC_{norm} = \frac{\left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma_{Ref}}\right)}{\left(\frac{\Delta E}{E_{Ref}}\right)} = \frac{\left(\frac{\sigma_{Min}-\sigma_{Max}}{\sigma_{Ref}}\right) \cdot 100\%}{\left(\frac{E_{Min}-E_{Max}}{E_{Ref}}\right) \cdot 100\%} = \frac{\left(\frac{\sigma_{Min}-\sigma_{Max}}{\sigma_{Ref}}\right) \cdot 100\%}{1} \quad (5.4)$$

Der so ermittelte Sensitivitätskoeffizient bildet die Veränderlichkeit des Ergebniskennwertes (Standardabweichung Jahresprofil Raumlufttemperatur) in Bezug auf eine festgelegte Kombination aller anderen Eingabegrößen des Simulationsmodells ab. Es handelt sich um einen individuellen Sensitivitätskoeffizienten welcher auf ein Basis- Simulationsmodell bezogen ist. Die Variabilität der übrigen Simulationseingangsgrößen wie z.B. der anderen unbekanntem Nutzungsprofile bleibt darin unberücksichtigt. Um die daraus entstehende Unsicherheit zu begrenzen, enthält das Basissimulationsmodell die Minimalvarianten aller unbekanntem Nutzungsprofile.

5.8. Verfahrensprozedur

Die Methode beginnt mit der Identifikation aller nicht bekannten Nutzungsprofile, z.B. Lüftungsverhalten und Nutzeranwesenheit. Basierend auf Stichproben und theoretischen Überlegungen werden Profilvarianten erarbeitet. Grundlage für diese Profilvarianten sind die Abhängigkeitsdiagramme, welche sowohl die bekannten als auch die zu vermutenden Einflussfaktoren aufführen. Ein Beispiel für ein solches Diagramm ist Abb. 5.6 in Kapitel 5.5. Die bekannten Abhängigkeiten werden übernommen, die zu vermutenden Abhängigkeiten werden in ihrem möglichen Wertebereich variiert und miteinander kombiniert.

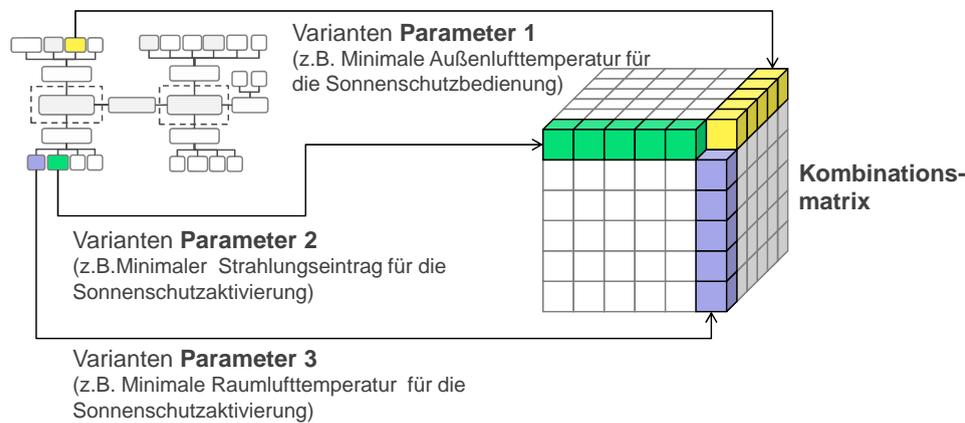


Abbildung 5.13.: Erstellung einer Kombinationsmatrix aus den Varianten der vermuteten Einflussgrößen des Abhängigkeitsdiagramms

Aus diesen Varianten werden eine Minimal- und eine Maximalvariante ausgewählt.¹⁵ Die Minimalvarianten aller unbekanntem Nutzungsprofile werden in einem Basis-Simulationsmodell zusammengefasst. Für jedes Nutzungsprofil wird die Maximalvariante mit den Wertannahmen des Basis-Simulationsmodells für die übrigen Profile erstellt und simuliert. Für jede Profilvariante kann auf diese Weise der Sensitivitätskoeffizient gemäß Gleichung 5.4 ermittelt werden. Das Nutzungsprofil mit dem größten Sensitivitätskoeffizienten entspricht der obersten Einfluss- bzw. Hierarchieebene. Mit diesem Profil beginnen die nachfolgenden Simulationsreihen.

¹⁵Die Minimalvariante entspricht der Variante mit dem erwartungsgemäß geringsten Einfluss auf die Standardabweichung des Jahresverlaufs der Raumlufttemperatur. Die Maximalvariante entspricht im Gegensatz dazu der Variante, welche die größte Standardabweichung verursacht.

5. Entwicklung eines eigenen Kalibrierverfahrens

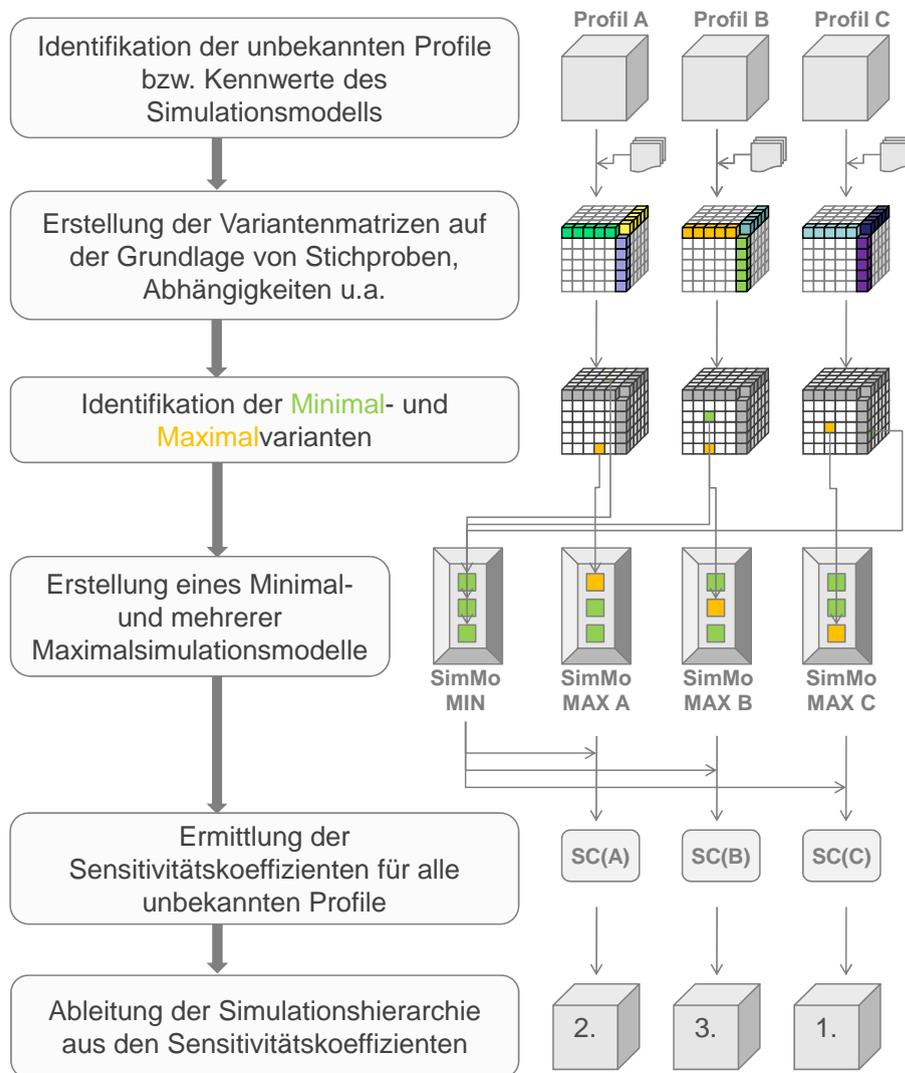


Abbildung 5.14.: Sensitivitätsanalyse: Vorgehensweise zur Ermittlung der Einfluss-hierarchien der unbekannt Nutzungsprofile

Ausgehend vom Basis- Simulationsmodell werden sämtliche Varianten des einflussreichsten Nutzungsprofils simuliert. Die Ergebnisse dieser Rechnungen werden jeweils mit dem gemessenen Verlauf verglichen und in Bezug auf das Gütekriterium, den linearen Korrelationskoeffizienten, ausgewertet. Die Nutzungsprofilvariante mit dem höchsten Wert des Korrelationskoeffizienten, d.h. der besten Übereinstimmung zur Messreihe wird in das Simulationsmodell übernommen. Anschließend wird mit dem Profiltyp der nächsten Hierarchieebene fortgefahren um auch hierfür die Vari-

ante mit der besten Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation zu identifizieren und in das Simulationsmodell zu übernehmen. Diese Vorgehensweise wird bis zur letzten Hierarchieebene fortgeführt. Das entspricht einer sukzessiven Anpassung bzw. Kalibrierung des Simulationsmodells.

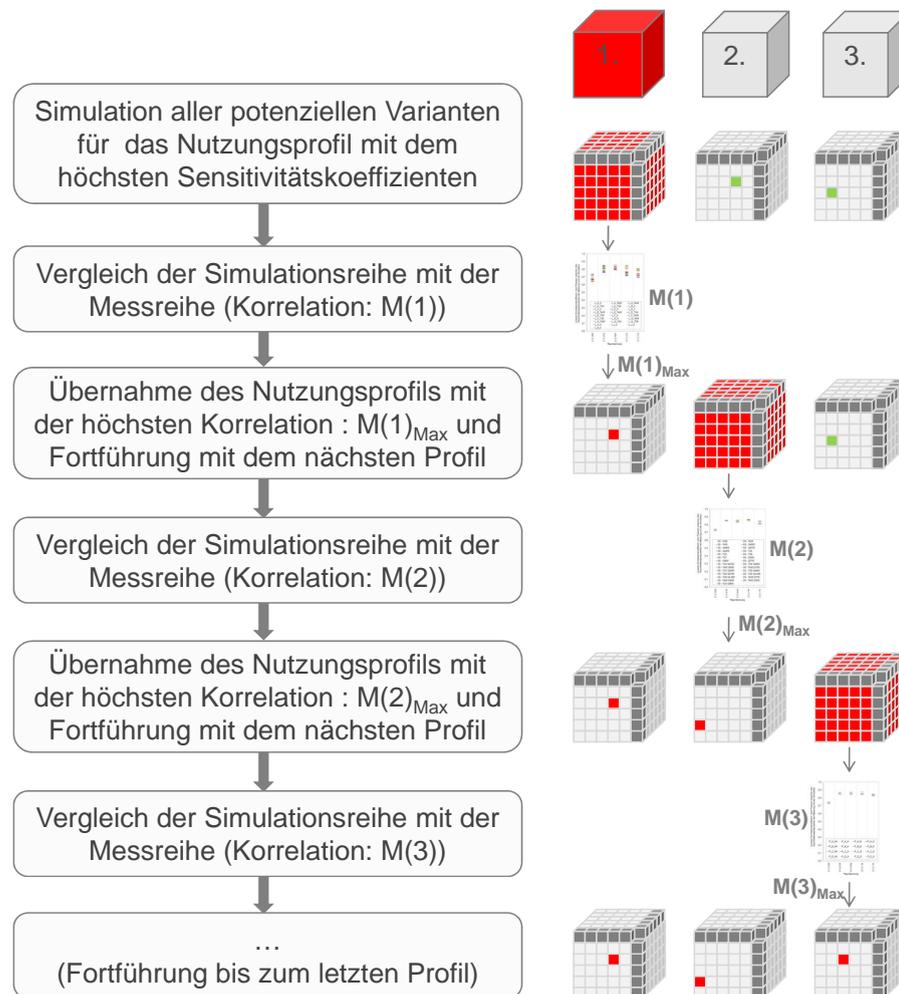


Abbildung 5.15.: Vorgehensweise zur stufenweisen Ermittlung der am besten mit den Messergebnissen übereinstimmenden Nutzungsprofilvarianten.

Das erläuterte Kalibrierverfahren wird nachfolgend für die gewählten Raumtypen des Krankenhausbaus erläutert und durchgeführt. Simulation und Messung wurden in dieser Gegenüberstellung für eine Periode von drei Monaten für den Verlauf der Raumlufttemperatur verglichen und ausgewertet. Die Simulationsrechnungen wurden mit der Software Energy Plus, Version 7.1, durchgeführt. Die Auswertung der

5. *Entwicklung eines eigenen Kalibrierverfahrens*

Simulationsdaten erfolgte automatisiert mit Hilfe einer Skriptsprache (Python). Die Vorgehensweise ist insofern mit überschaubarem Zeitaufwand umsetzbar. Lediglich die Profilvarianten wurden von Hand erstellt und in das Simulationsmodell übertragen, auch wenn hierfür ebenfalls eine automatisierte Vorgehensweise denkbar ist.

5.8.1. Aufstellung der Varianten für die unbekannt Profile

Aus den im vorherigen Kapitel aufgeführten theoretischen Überlegungen und praktischen Stichproben wurden nachfolgend mögliche Varianten der Nutzungsprofile für die Sonnenschutzaktivierung, die Fensteröffnung und die Wärmeabgabe durch Personen und technische Ausstattungen erstellt.

Profilvarianten für die Sonnenschutzaktivierung

Abbildung 5.16 enthält eine Übersicht der in den Simulationsstudien untersuchten Varianten für die Sonnenschutzaktivierung.

SS			Außenklimatische Grenzwerte							
			keine	Globalstrahlung				Außenlufttemperatur		
			-	500 W/m ²	600 W/m ²	700 W/m ²	800 W/m ²	26 °C	28 °C	30 °C
Raumklimatische Grenzwerte	Raumlufttemperatur	27 °C	Ti27 Qe500							
		26 °C	Ti26	Ti26 Qe600		Ti26 Qe800				
		25 °C	Ti25		Ti25 Qe700	Ti25 Qe800				
		24 °C	Ti24	Ti24 Qe600	Ti24 Qe700	Ti24 Qe800				
	Strahlungseintrag	700 W/m ²	Qi700				Te26 Qi700		Te30 Qi700	
		600 W/m ²	Qi600					Te28 Qi600	Te30 Qi600	
		500 W/m ²	Qi500						Te30 Qi500	
	keine	-		Qe500	Qe600	Qe700	Qe800	Te26	Te28	Te30

Abbildung 5.16.: Übersicht der untersuchten Varianten für die Sonnenschutzaktivierung. Die Minimalvariante wurde blau, die Maximalvariante rot gekennzeichnet.

In allen Fällen wurden eine Grenzwindgeschwindigkeit ($8 \frac{m}{sec}$) und eine nutzerbedingte Einfahrverzögerung ($t_B = 3h$) berücksichtigt. Hierfür konnten die lokalen Mess-

5. Entwicklung eines eigenen Kalibrierverfahrens

werte der maximalen Windgeschwindigkeit zur Anwendung kommen. Die Kennungen der Sonnenschutzaktivierungsvarianten enthalten jeweils den berücksichtigten Parameter und den Grenzwert. Eine Variantenübersicht bietet Abb. 5.16.

Aus der Stichprobenuntersuchung in Abschnitt 5.5.1 ging hervor, dass der Sonnenschutz in den Patientenzimmern während des betrachteten Sommertages nahezu ausrichtungsunabhängig bedient wird. Aus diesem Grund wurden nachfolgend vorrangig allgemeine Kennwerte des Außenklimas (Außenlufttemperatur und Globalstrahlung) und des Raumklimas (Raumlufttemperatur) untersucht. Darüber hinaus wurde auch ein richtungsabhängiger Kennwert, der Strahlungseintrag auf der jeweiligen Fassade, betrachtet.

Die Minimalvariante entspricht in dieser Auswahl Variante T_{i24} . Diese Kennung besagt, dass der Sonnenschutz immer dann aktiviert wird, wenn die Raumlufttemperatur θ_{RL} höher als 24°C ist. Als Maximalvariante wurde Variante t_{e30} identifiziert. Darin wird der Sonnenschutz immer dann aktiviert, wenn die Außenlufttemperatur θ_e höher als 30°C ist.

Profilvarianten für das Fensteröffnungsverhalten (Lüftung)

Eine Übersicht der aufgestellten Fensteröffnungsvarianten enthält Abbildung 5.17.

Die aufgestellten Varianten setzten sich jeweils aus einem Zeitprofil (A bis K, siehe dritte Spalte Abb. 5.17) sowie einem zusätzlich berücksichtigten Raum- bzw. Außenklimakennwert zusammen. Die Fenster werden entsprechend des Tagesprofils geöffnet wenn die Raumlufttemperatur den jeweiligen Wert überschreitet bzw. die Außenlufttemperatur den jeweiligen Grenzwert unterschreitet.

Aus den in Abschnitt 5.5.2 durchgeführten Stichproben wurde ersichtlich, dass die Fenster während des Sommertages im Mittel wenig geöffnet waren, d.h. in der Regel Kippstellung vorhanden war. Diese Grundeinstellung wurde nachfolgend mit Varianten der Stoßlüftung in variierenden Zeitabschnitten kombiniert. In den aufgeführten Zeitprofilvarianten A bis K sind jeweils auf der Ordinate die prozentualen Anteile der geöffneten Fläche und auf der Abszisse die Tageszeitabschnitte aufgetragen.

Die Minimalvariante der Fensteröffnung ist die permanente Fugenlüftung I_O , die Maximalvariante ist Variante D_0 .

L			Temperaturgrenzwerte				
			keine	Außenlufttemperatur		Raumlufttemperatur	
			-	26 °C	28 °C	24 °C	26 °C
Zeitprofilvarianten der prozentualen Öffnungsfläche	A		A_0	A_Te26	A_Te28	A_Ti24	A_Ti26
	B		B_0				
	C		C_0				
	D		D_0				
	E		E_0	E_Te26	E_Te28	E_Ti24	E_Ti26
	F		F_0	F_Te26		F_Ti24	
	G		G_0	G_Te26	G_Te28	G_Ti24	G_Ti26
	H		H_0				
	I		I_0				
	J		J_0				
	K		K_0				

Abbildung 5.17.: Übersicht der untersuchten Varianten für die Fensteröffnung. Die Minimalvariante wurde blau, die Maximalvariante rot gekennzeichnet.

Profilvarianten für die Wärmeabgabe durch Personen

Die nachfolgenden Varianten stellen Profilvarianten für die personenbedingten Wärmelasten dar. Die Varianten setzen sich aus einer Zeitprofilvariante (A bis D) und einer Aktivitätsvariante (KK, K, ER, Ä) zusammen.

Die Zeitprofile basieren auf den in Abschnitt 5.5.3 ermittelten Anwesenheitszeiten. Es wurden vier Verteilungsvarianten einer um 30% erhöhten Belegungsdichte betrachtet, ganztägig durchgängig erhöht (A), ganztägig außer während der Mittagszeit

5. Entwicklung eines eigenen Kalibrierverfahrens

P		Personentypen				
		Kleinkind	Kind	Erwachsener	Älterer	
		27 W/Pers	65 W/Pers	80 W/Pers	68 W/Pers	
Zeitprofile der Anwesenheit	A		A_KK	A_K	A_ER	A_Ä
	B		B_KK	B_K	B_ER	B_Ä
	C		C_KK	C_K	C_ER	C_Ä
	D		D_KK	D_K	D_ER	D_Ä

Abbildung 5.18.: Übersicht der untersuchten Varianten für die Wärmeabgabe durch Personen. Die Minimalvariante wurde blau, die Maximalvariante rot gekennzeichnet.

erhöht (B), vormittags erhöht (D) und nachmittags erhöht (D). Außerhalb dieser Stoßzeiten beträgt die Belegungsdichte der Normbelegung von zwei Personen pro Raum.

Die Aktivität wurde gemäß der unterschiedlichen Patiententypen sowie gemäß eines angenommen Tagesverlaufs des Grundumsatzes angepasst. Vier Personentypen sind in dieser Aufstellung enthalten, Kleinkinder (KK), Kinder (K), Erwachsene (ER) und Ältere (Ä). Als Kennwerte für die sensible Wärmeabgabe der Personen wurde Folgendes angenommen: $Q_{Kind,1a} = 27 \frac{W}{Pers}^{16}$, Kinder im Alter von 13 Jahren, $Q_{Kind,13a} = 65 \frac{W}{Pers}^{17}$, Erwachsene im Alter von 30 Jahren $Q_{Erw,30a} = 80 \frac{W}{Pers}^{18}$ und Erwachsene im Alter von 60 Jahren $Q_{Erw,60a} = 68 \frac{W}{Pers}^{19}$.

In diesen Profilen wurde davon ausgegangen, dass der angegebene Grundumsatz

¹⁶Bedingungen für Kleinkind: Körperoberfläche $A_{DuBois} = 0.54m^2$, Grundumsatz $Q_{met} = 49 \frac{W}{m^2}$

¹⁷Bedingungen für Kind: Körperoberfläche $A_{DuBois} = 1.35m^2$, Grundumsatz $Q_{met} = 49 \frac{W}{m^2}$

¹⁸Bedingungen für 30-jährigen Erwachsenen: Körperoberfläche $A_{DuBois} = 1.90m^2$, Grundumsatz $Q_{met} = 41 \frac{W}{m^2}$

¹⁹Bedingungen für 60-jährigen Erwachsenen: Körperoberfläche $A_{DuBois} = 1.90m^2$, Grundumsatz $Q_{met} = 36 \frac{W}{m^2}$

während der Nacht vorliegt. Das 1.5- fache dieses Grundumsatzes wurde als Leistungsumsatz während des Tages angesetzt.

In dieser Zusammenstellung ist Version D_{KK} die Minimalvariante und Version A_{ER} die Maximalvariante.

Profilvarianten für die zusätzlichen Wärmelasten

Die Varianten der Wärmeabgabe- Nutzungsprofile wurden in Abbildung 5.19 zusammengefasst.

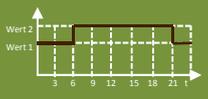
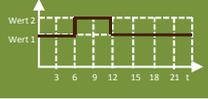
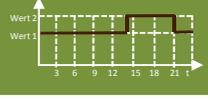
W			Grundlast / Temporäre Last				
			1	2	3	4	5
			50/50 W	50/100 W	50/150 W	50/200 W	50/0 W
Zeitprofile Wärmeabgabe	A		A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
	B		B_1	B_2	B_3	B_4	B_5
	C		C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
	D		D_1	D_2	D_3	D_4	D_5

Abbildung 5.19.: Übersicht der untersuchten Varianten für die Wärmeabgabe durch Beleuchtung und Geräte. Die Minimalvariante wurde blau, die Maximalvariante rot gekennzeichnet.

Die Wärmelasten aus Geräten und Beleuchtung setzen sich aus einem Zeitprofil (A bis D) und einer Grundlast- Temporärlast- Wertkombination zusammen. Zur Grundlast sind jene Geräte zu zählen welche während der Nutzungszeit permanent betrieben werden. Dazu gehören im Patientenzimmer beispielsweise die Beleuchtung und permanent betriebene medizinische Geräte. Temporäre Lasten entsprechen den zeitweilig vorhandenen Lasten. Diese können im Patientenzimmer beispielsweise Fernsehapparate oder ebenfalls medizinische Geräte sein.

5. Entwicklung eines eigenen Kalibrierverfahrens

In dieser Übersicht ist Variante A_1 die Minimalvariante und Variante A_4 die Maximalvariante.

5.8.2. Sensitivitätsstudie Nutzungsprofile

Ziel der Sensitivitätsstudie ist es, den Einfluss der Nutzungsprofiltypen auf die resultierende Raumlufttemperatur zu quantifizieren. Im vorliegenden Ansatz geht es dabei um den Einfluss auf die Standardabweichung der simulierten Raumlufttemperatur. Profiltypen mit einem hohen Betrag des normierten Sensitivitätskoeffizienten haben dabei einen größeren Einfluss als Profiltypen mit einem geringeren Betrag. In Abbildung 5.20 wurden die Ergebnisse der Sensitivitätskoeffizienten für alle unbekanntenen Profiltypen und alle betrachteten Räume (21.2.328 bis 21.4.421) zusammengefasst.

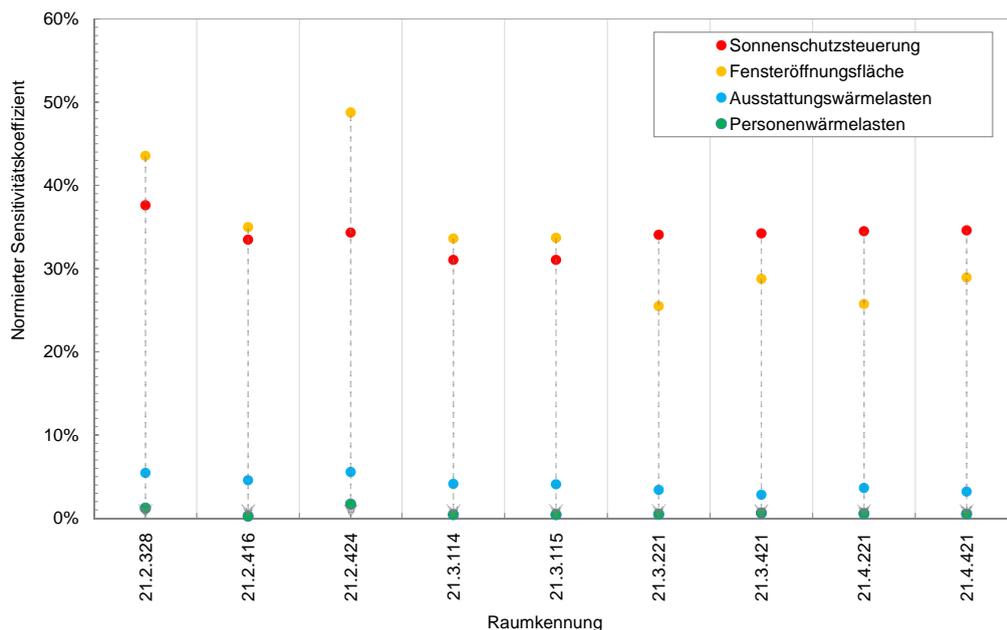


Abbildung 5.20.: Normierte Sensitivitätskoeffizienten gemäß Gleichung 5.4 für die unterschiedlichen Räume und Nutzungsprofiltypen

Es ist ersichtlich, dass die Sonnenschutzsteuerung in den Räumen der Obergeschosse den größten Einfluss nimmt. Für die übrigen Räume ist der Einfluss des Lüftungsverhaltens von primärer Bedeutung. Das Ergebnis dieser Sensitivitätsanalyse wird in den nachfolgenden Simulationsreihen als Reihenfolge für die Variantenuntersuchung

5.8. Verfahrensprozedur

angewandt. Die Pfeile in Abbildung 5.20 geben die Reihenfolge dieser Simulationsstudien an. Demzufolge wird mit der Untersuchung aller Fensteröffnungsvarianten in den Räumen 21.2.328 bis 21.3.115 begonnen. In den übrigen Räumen werden zuerst die Varianten der Sonnenschutzsteuerung simuliert und analysiert.

5. Entwicklung eines eigenen Kalibrierverfahrens

5.8.3. Simulationsstudien zur Ermittlung der realistischsten Nutzerprofile

Die aus der Sensitivitätsanalyse ermittelte Hierarchie ergab die Sonnenschutzsteuerung und das Fensteröffnungsverhalten als einflussreichste Nutzungsprofile. Für diese Profile wurden alle möglichen Varianten basierend auf den aufgestellten Varianten in Abschnitt 5.8.1 und den übrigen Einstellungen des Minimalsimulationsmodells evaluiert. Der Vergleich erfolgt über den Korrelationskoeffizienten gemäß Gleichung 5.2 zwischen den durch die Messung erfassten Raumlufttemperaturverläufen und den simulierten Raumlufttemperaturverläufen. Dieser Kennwert sollte im Idealfall, da Mess- und Simulationsreihe idealerweise identisch sind, nah am Wert 1 liegen. Die Ergebnisse dieser Variantenuntersuchung enthalten die nachfolgenden Diagramme in Abbildung 5.21. Darin entspricht jeder Balken dem Korrelationskoeffizienten einer simulierten Variante für eine Zone. Die Simulationsvarianten mit dem höchsten linearen Korrelationskoeffizienten stimmen am stärksten den Messergebnissen überein.

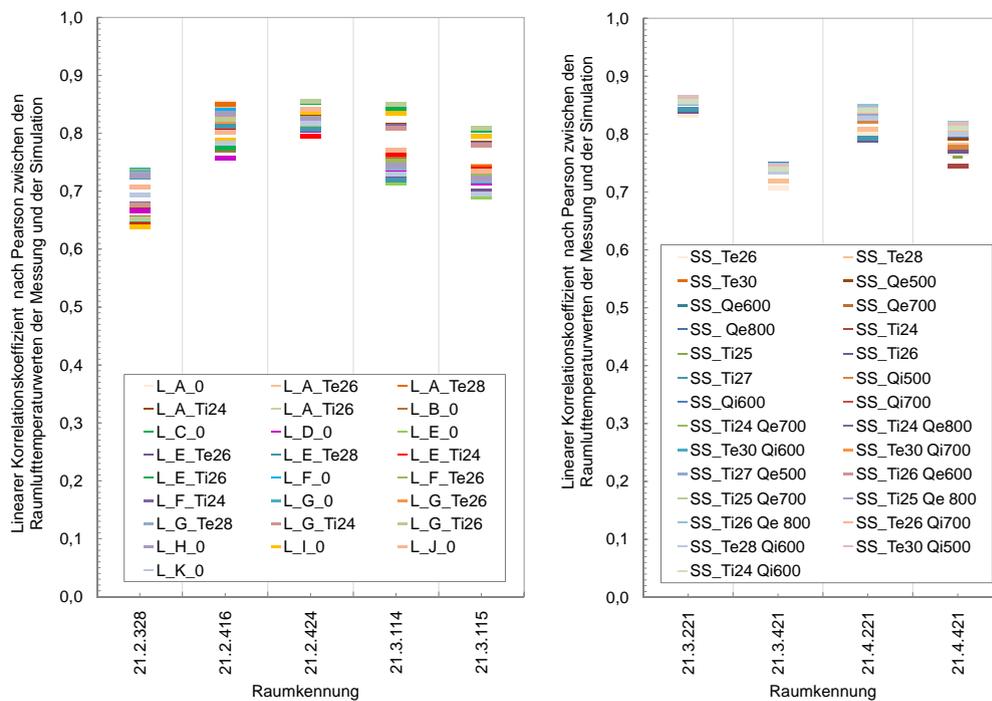


Abbildung 5.21.: Ergebnis der Simulationsstudie zur Ermittlung der am besten korrelierenden Profilvarianten für die Fensteröffnung (links) und die Sonnenschutzaktivierung (rechts).

Unter den Varianten der Fensteröffnung erzielen im Mittel aller Zonen die Version $A_{T_{i26}}$ sowie die Variante $G_{T_{i26}}$ die beste Übereinstimmung zur Messung. Demzufolge erfolgte im Gebäude vorwiegend Lüftung über Kippstellung wenn die Raumlufttemperatur gleich oder größer als 26°C (Variante $A_{T_{i26}}$) ist. Dieses Lüftungsschema ist für einige Räume während des Vormittags mit einer Stoßlüftung kombiniert (Variante $G_{T_{i26}}$).

Für die untersuchten Sonnenschutzsteuerungsvarianten in den Räumen der Obergeschosse ergibt sich die beste mittlere Übereinstimmung für die Variante $T_{i26} Q_{e800}$. In dieser Variante wird immer dann die Verschattung aktiviert, wenn die Raumlufttemperatur höher als 26°C ist und gleichzeitig die Globalstrahlung im Außenraum $800 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ übersteigt. Eine ähnlich gute Korrelation erzeugt Variante $T_{e30} Q_{i700}$ in welcher der Sonnenschutz immer dann aktiviert wird, wenn die Außenlufttemperatur 30°C übersteigt und gleichzeitig der Strahlungseintrag auf der jeweiligen Fassade mehr als $700 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ beträgt.

Die am besten korrelierende Variante jedes einzelnen Raumes wurde in das Simulationsmodell übernommen um damit die Varianten des zweit-einflussreichsten Nutzungsprofils, Fensteröffnung und Sonnenschutzsteuerung, zu untersuchen. Eine Übersicht der Ergebnisse aller Fensteröffnungs- und Sonnenschutzsteuerungsvarianten in der zweiten Hierarchieebene enthält Abbildung 5.22

In diesen Simulationsreihen stimmt für die Sonnenschutzsteuerung im Mittel der Untergeschossräume Variante Q_{i500} am besten mit der Messung überein. In dieser Variante erfolgt eine Aktivierung des Sonnenschutzes wenn der Strahlungseintrag auf der Raumfassade $500 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ übersteigt. Die zweitbeste mittlere Übereinstimmung erzeugt Variante Q_{e500} in welcher der Sonnenschutz ab einem Globalstrahlungskennwert von $500 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ aktiviert wird.

Unter den simulierten Fensteröffnungsvarianten der Obergeschossräume erzielte Variante I_0 , d.h. die permanente Fugenlüftung, die beste Übereinstimmung zu den Messergebnissen. Nur leicht schlechtere Korrelationen erzeugen Variante $G_{T_{i26}}$ und Variante $A_{T_{i26}}$. Letztere sind die beiden Varianten welche sich für die Räume der Untergeschosse in der ersten Hierarchieebene als beste Varianten herausstellten.

Für die Sonnenschutz- und Fensteröffnungssteuerung sind die am besten korrelierenden Profile aus der ersten und zweiten Simulationsreihe ermittelt worden. Die

5. Entwicklung eines eigenen Kalibrierverfahrens

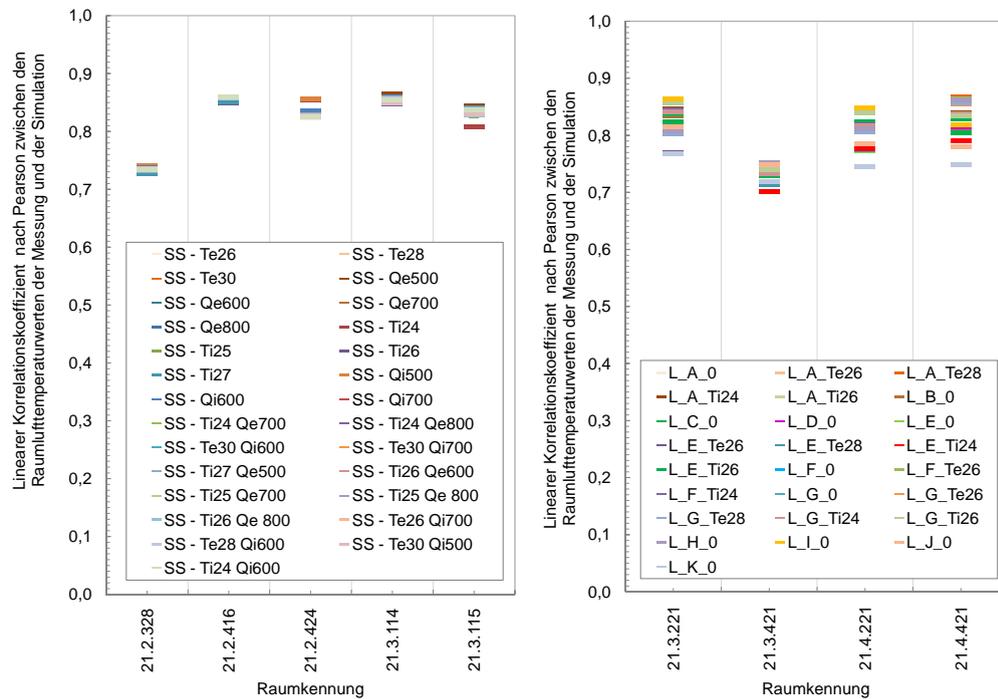


Abbildung 5.22.: Ergebnis der Simulationsstudie zur Ermittlung der am besten korrelierenden Profilvarianten für die Sonnenschutzaktivierung (links) und die Fensteröffnung (rechts).

Identifikation der Nutzungsprofile für die zusätzlichen Wärmelasten aus Gerätebetrieb und Beleuchtung sowie aus Personenwärmeabgabe erfolgt in der dritten und vierten Simulationsstudie.

Eine Gegenüberstellung der Korrelation aller Teilvarianten für die zusätzlichen Wärmelasten aus technischen Wärmequellen enthält die folgende Abbildung 5.23. Da dieser Profiltyp sowohl für die Räume des Obergeschosses als auch für die Räume der Untergeschosse aus der Sensitivitätsstudie als dritt- einflussreichstes Nutzungsprofil hervorging, werden die möglichen Varianten darin für alle Räume gemeinsam gegenübergestellt.

Das Ergebnis dieser Simulationsreihe ist für alle Räume identisch. Die Variante mit dem geringsten Betrag der zusätzlichen Wärmelasten, A_5 , erzeugt die beste Korrelation. In dieser Variante sind während des Tages von 6 bis 21 Uhr keine gerätebedingten Wärmelasten vorhanden. In der übrigen Zeit wird eine Wärmelast von $50 \frac{W}{Raum}$ angenommen.

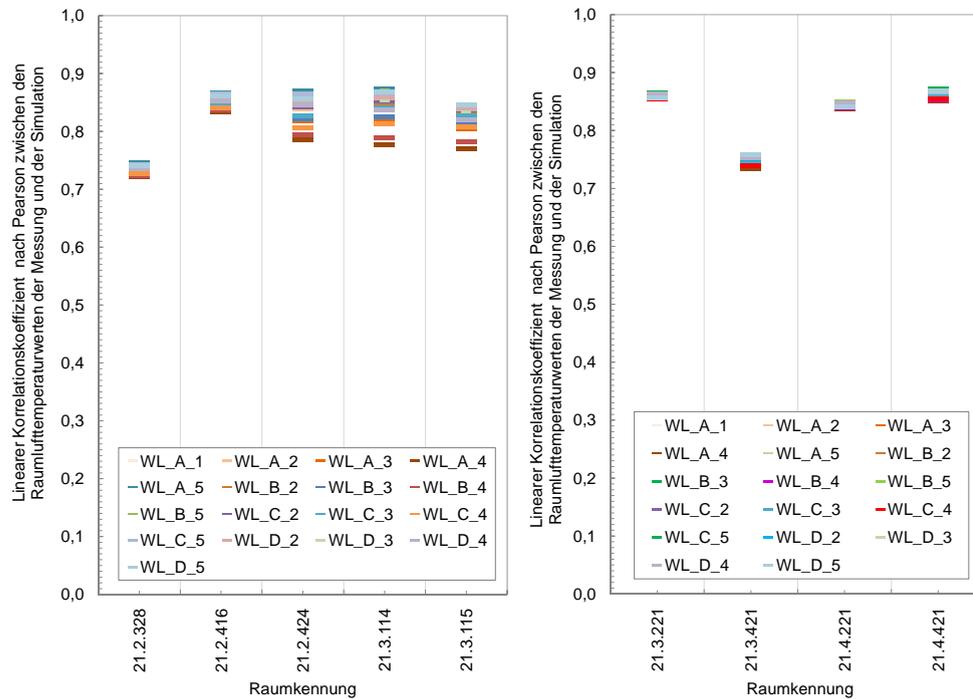


Abbildung 5.23.: Ergebnis der Simulationsstudie zur Ermittlung der am besten korrelierenden Ausstattungswärmelastvariante.

Diese ermittelte Variante der zusätzlichen Wärmeeinträge wird in das Simulationsmodell übernommen um damit in der letzten Simulationsreihe das am besten korrelierende Profil der Nutzeranwesenheit, d.h. der Wärmeabgabe durch die Nutzer zu bestimmen. eine Übersicht der Simulationsergebnisse enthält Abbildung 5.24.

Die höchste Übereinstimmung erzielte im Mittel aller Räume Variante D_{KK} , d.h. eine Wärmeemission welche, dem Betrag nach, der Anwesenheit zweier Kleinkinder entspricht und während des Nachmittags erhöht ist.

Das Ergebnis der linearen Korrelation zwischen Messung und Simulation mit dem kalibrierten Modell konnte in der letzten Simulationsstudie auf einen Betrag von 0,84 im Mittel aller Räume verbessert werden. Dabei korrelieren einige Räume schlechter (z.B. Raum 21.2.238: 0,75) und andere besser (z.B. Raum 21.3.115: 0,85).

5. Entwicklung eines eigenen Kalibrierverfahrens

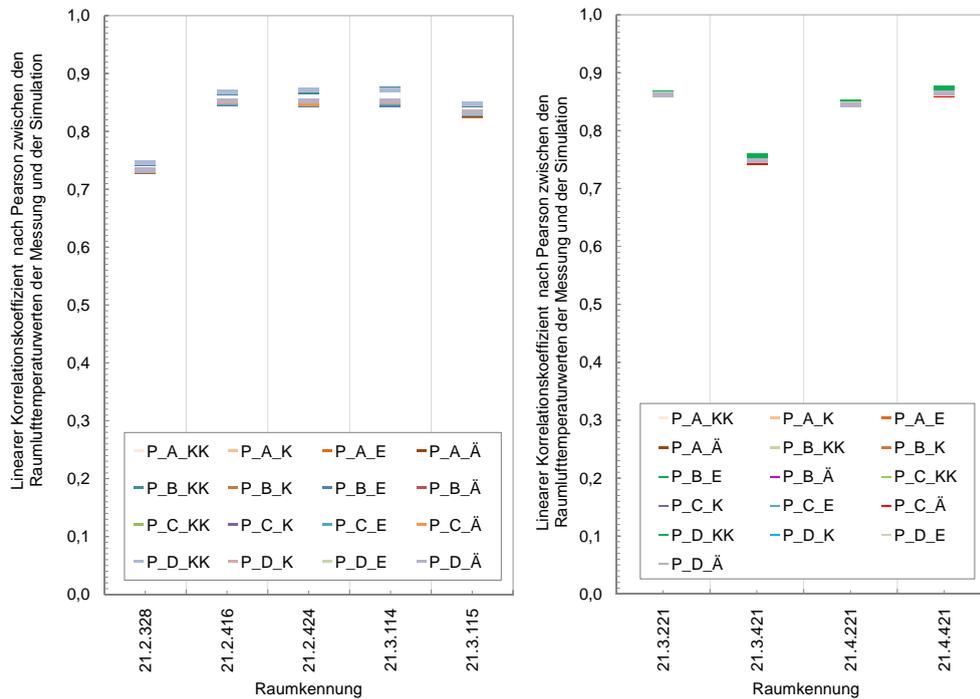


Abbildung 5.24.: Ergebnis der Simulationsstudie zur Ermittlung der am besten korrelierenden Personenwärmelastvariante.

5.8.4. Ergebnis

Eine Übersicht über die Ergebnisse der einzelnen Hierarchieebenen der Simulationsstudien enthält Abbildung 5.25. In der Basisvariante mit den freien Annahmen für die Nutzungsprofile betrug der mittlere Korrelationskoeffizient 0,79. Aus einer Aufstellung möglicher Nutzungsprofilvarianten ergaben sich für jeden Profiltyp Minimalvarianten, welche unter den aufgestellten Varianten zur geringsten Veränderung der Raumlufttemperatur im Simulationsergebnis führten. Aufbauend auf einem Simulationsmodell mit diesen Minimalversionen der Nutzungsprofile wurden die Simulationsstudien durchgeführt. Der Korrelationsfaktor betrug für diese Minimalversion im Mittel aller Räume 0,78. Der Wert konnte nach der ersten Simulationsreihe und der Ermittlung von Fensteröffnungs- bzw. Sonnenschutzaktivierungsprofile auf einen Betrag von 0,82 verbessert werden. Nach der zweiten Simulationsreihe betrug der Korrelationskoeffizient im Mittel aller Räume 0,83. Nach der dritten Simulationsreihe und der Ermittlung des am besten korrelierenden Wärmelastprofils betrug er 0,84. Die letzte Simulationsreihe zur Feststellung des am besten korrelierenden Per-

sonenwärmelastprofils brachte schließlich nur noch eine sehr geringe Verbesserung. So dass das Ergebnis der Kalibrierung, der lineare Korrelationskoeffizient zwischen gemessener und simulierter Raumlufttemperatur, im Mittel aller Räume 0,84 beträgt.

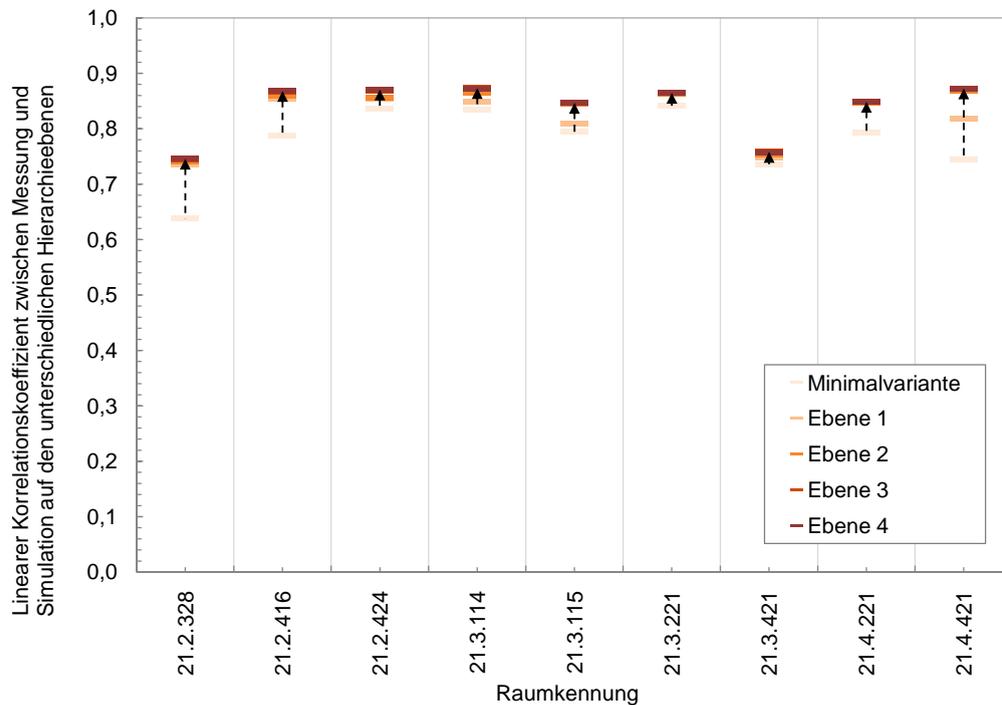


Abbildung 5.25.: Diagrammdarstellung der auf den jeweiligen Hierarchieebenen erreichten Korrelation zwischen Messung und Simulation

Der lineare Korrelationsfaktor sagt nichts über die Übereinstimmung der absoluten Beträge der Simulationsrechnung und der Messung aus. So könnte trotz hoher Korrelation eine große Abweichung zwischen den Absolutwerten (z.B. Mittelwert, Minimum, Maximum der Raumlufttemperatur) der Messung und der Simulation auftreten. Eine realitätsnahe Auswahl der untersuchten Nutzungsprofile sollte zur Vermeidung dieser Diskrepanzen beitragen. Abbildung 5.26 enthält eine Gegenüberstellung der Absolutbeträge der Messung und der Simulation. Es ist zu erkennen, dass auch quantitativ eine Verbesserung erzielt wurde. Im Vergleich zum Basismodell (siehe Abb. 5.5) entsprechen die Kennwerte der Häufigkeitsverteilung und die Einzelkennwerte des Raumlufttemperaturverlaufs (z.B. mittlere Raumlufttemperatur) stärker dem Messergebnis als es in dem ersten Simulationsmodell (vgl. Abb. 5.5 auf S. 92) der Fall war.

5. Entwicklung eines eigenen Kalibrierverfahrens

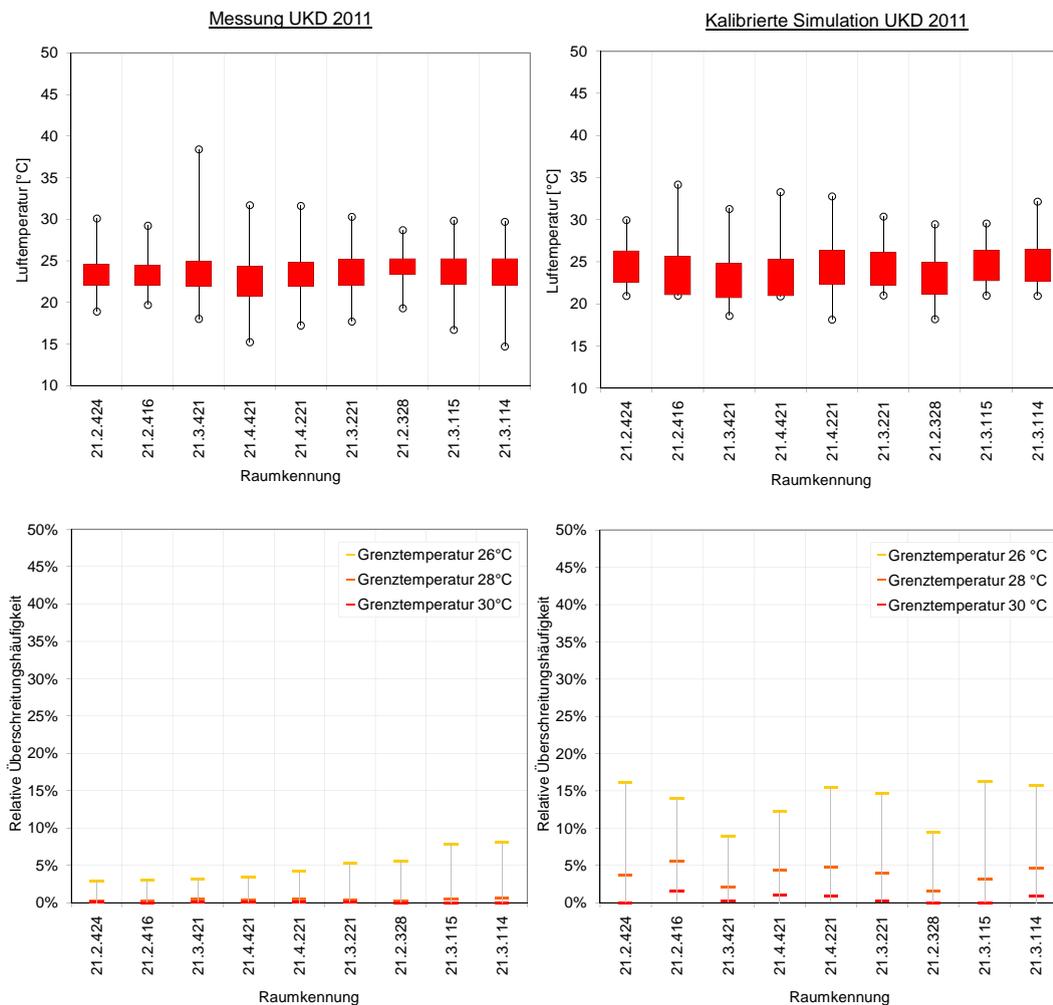


Abbildung 5.26.: Darstellung der Raumlufttemperaturkennwerte aus der Messung (links) und der Simulation mit dem kalibrierten Modell

Die Ergebnisse der Methode geben damit einen wertvollen Hinweis auf das tatsächliche Nutzerverhalten im Gebäude, d.h. in den Patientenzimmern. Es wurde einerseits festgestellt, dass die anfallenden Geräte- und Personenwärmelasten sehr konstant sind. Andererseits wurden für die Sonnenschutzsteuerung und die Fensteröffnung Profile ermittelt, welche erheblich von den in der Basissimulation angenommenen Bedingungen abweichen.

5.9. Zusammenfassung

Das vorhergehende Kapitel stellt eine Methode zur Ermittlung der praktischen Nutzungsprofile in einem Gebäude vor. Das Ergebnis des kalibrierten Simulationsergebnisses entspricht für die beispielhaften Räume qualitativ (lineare Korrelation) und quantitativ (Absolutwerte) deutlich stärker den gemessenen Bedingungen. Die Korrelation konnte, ausgehend von einer Minimalvariante mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,78, auf einen Wert von 0,84 verbessert werden. Ebenso wurden die Absolutwerte der simulierten Raumlufttemperatur realistischer.

Für die verbleibenden Ungenauigkeiten kommen mehrere Ursachen in Frage. In Bezug auf die Nutzungsprofile ist mit einer weiteren erheblichen Ungenauigkeit aus der idealisierten Betrachtung des Steuerungsverhaltens der Nutzer zu rechnen. So wird in den betrachteten Profilen beispielsweise davon ausgegangen, dass der Nutzer bei Überschreitung eines Grenzwertes immer eine Aktion folgen lässt. Das reale Nutzerverhalten wird dem gegenüber durch stochastisch verteilte, d.h. zufallsbedingte Einflüsse geprägt sein. Die erzielbare Korrelation mit dem hier verfolgten deterministischen Ansatz ist allein dadurch schon erheblich beschränkt. Neben dieser Ungenauigkeit sind auch Unsicherheiten in den angesetzten Konstruktions-, Geometrie- oder Gebäudeumfelddaten vorhanden welche hier nicht näher betrachtet wurden.

6. Nutzeranforderungen und Bewertungsmodelle

Krankenhausnutzer sind eine sehr heterogene Personengruppe mit unterschiedlichen physiologischen und psychologischen Ansprüchen an das Raumklima. Im nachfolgenden Abschnitt sollen die wesentlichen Eigenschaften dieser Personen im Bezug auf die Raumklimaempfindung erörtert werden. Zu diesen Eigenschaften gehören beispielsweise die allgemeinen Gegebenheiten, z.B. der reduzierte Stoffwechsel oder die isolierende Wirkung des Bettes. Des Weiteren können Krankheiten, Medikamente, Behinderungen oder altersbedingte Veränderungen die Raumklimaempfindung beeinflussen. Diese allgemeinen Erkenntnisse werden in einer Literaturstudie zusammengetragen. An Hand vereinfachter Modelle des körperlichen Thermoregulationssystems werden diese Eigenschaften der Patienten abgebildet. Aus den Ergebnissen dieser Modelle können Kennwerte der Raumklimaempfindung berechnet werden. Diese Kennwerte geben Aufschluss darüber, welche Temperaturbedingungen für die betreffenden Personen optimal sind.

6.1. Anforderungen und Besonderheiten der Krankenhausnutzer allgemein

Eine Besonderheit in Bezug auf die Raumklimaempfindung besteht in der Bekleidungsgewohnheit unterschiedlicher Personen im Krankenhaus (Personal, Patienten, Besucher). Für permanent oder zeitweilig bettlägerige Patienten führt das anliegende Bettsystem zu einer zusätzlichen Isolierung und einem erhöhten Verdunstungswiderstand. Zur Berücksichtigung dieser Besonderheiten empfiehlt sich die Anwendung der Kennwerte der internationalen Norm ISO 9920. Sie enthält Berechnungsvorschriften und Richtwerte für gängige Bekleidungskombinationen. In der nachfolgenden Tabelle 6.1 sind exemplarisch unterschiedliche Bekleidungsfälle und deren Kennwerte aufgelistet. [DIN EN ISO 9920, 2009]

Tabelle 6.1.: Wärmedurchlasswiderstand I_{cl} , Bekleidungsflächenfaktor f_{cl} und Verdunstungswiderstand $R_{e,cl}$ von Bekleidungs-systemen gemäß ISO EN DIN 9920, Anhang C

Nutzertyp	Bekleidungsform	$I_{cl}[\frac{m^2K}{W}]$	$f_{cl}[o.E.]$	$R_{e,cl}[\frac{m^2kPa}{W}]$
A) Patient	Bekleidung leicht (Nr. 5: Shorts, Hemd)	0.056	1.10	0.010
B) Patient	Bekleidung mittel (Nr. 3: Herrenkleidung Sommer)	0.089	1.15	0.015
C) Medizin. Personal	Arbeitsbekleidung kurz (Nr. 5: Shorts, Hemd)	0.056	1.10	0.010
C) Medizin. Personal	Arbeitsbekleidung lang (Nr. 12: Arbeitshose, Hemd)	0.141	1.18	0.025

Zur Abschätzung der Isolierung durch Bettsysteme existiert eine US-amerikanische Datenbank bzw. Veröffentlichung¹. Darin sind neben Richtwerten für gängige Bekleidungs- und Bettsystemkombinationen auch statistisch ermittelte Gleichungen zur Berechnung des Wärmedurchlasswiderstandes von Bettsystem- Bekleidungskombinationen $I_T[clo]$ enthalten. Die höchste Genauigkeit erzielt laut Aussage der Au-

¹[McCullough u. a., 1993]

6.1. Anforderungen und Besonderheiten der Krankenhausnutzer allgemein

toren folgende Gleichung. [McCullough u. a., 1993, S. 1064]

$$I_T = (0.033 \cdot f_{total}) + (-0.000052 \cdot m_{clo} \cdot f_{clo}) + (0.000033 \cdot m_{tot} \cdot f_{bla,clo}) - 1.13 \quad [clo] \quad (6.1)$$

Darin beschreibt $f_{total}[\%]$ den Anteil der durch das vollständige Bettssystem und die Bekleidung bedeckten Körperoberfläche, $m_{clo}[g/m^2]$ das flächenbezogene Gewicht der Bekleidung, $f_{clo}[\%]$ den ausschließlich durch die Bekleidung bedeckten Körperoberflächenanteil, $m_{tot}[g/m^2]$ das durchschnittliche flächenbezogene Gewicht von Bettssystem und Bekleidung sowie $f_{bla,clo}[\%]$ den durch Bettdecke und Bekleidung bedeckten Körperoberflächenanteil. [McCullough u. a., 1993]

Zur Spezifizierung der Patienteneigenschaften für die Raumklima- Bewertungsmethoden bietet es sich an, exemplarische Bettssysteme und deren Isolationswirkung einfließen zu lassen. Nachfolgend wurden für zwei frei gewählte Bekleidungs- und Bettdeckenkombinationen sowie zwei frei gewählte Bedeckungsgrade die Isolationskennwerte ermittelt. Eine symbolische Abbildung dieser Bedeckungs- und Bekleidungstypen enthält die nachfolgende Abbildung 6.1. Die Kennwerte dieser Typen sind in der nachfolgenden Tabelle 6.2 aufgeführt.

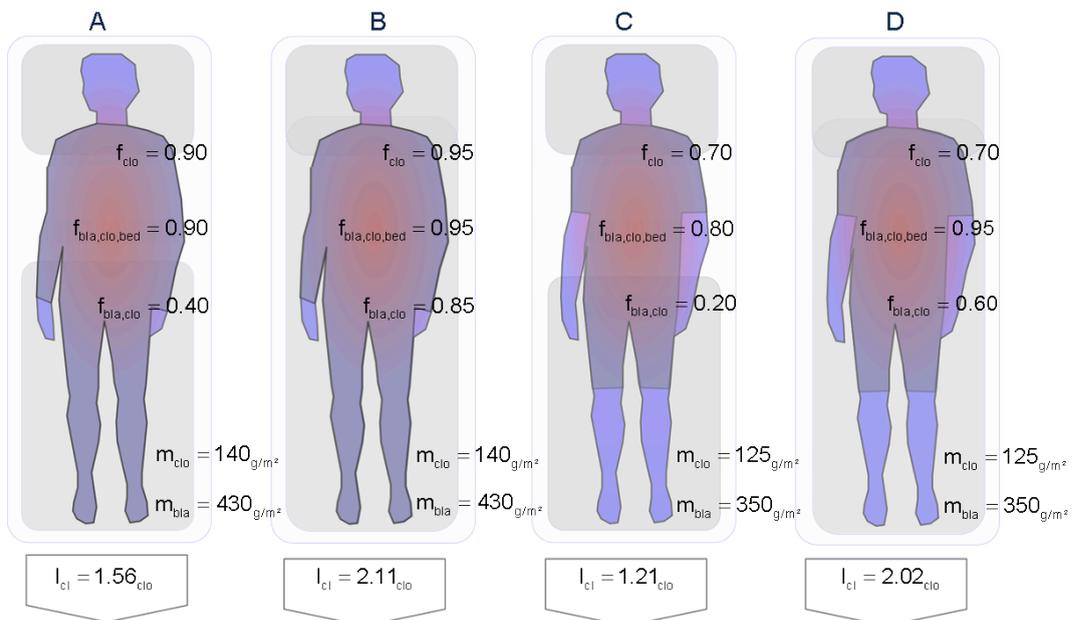


Abbildung 6.1.: Aufgestellte Bekleidungstypen der Krankenhauspatienten

6. Nutzeranforderungen und Bewertungsmodelle

Tabelle 6.2.: Berechnungswerte und resultierende Wärmedurchlasswiderstände I_{cl} von Bettsystemen gemäß [McCullough u. a., 1993, Gleichung 12, S. 1064]

Bettsystem	f_{total} [%]	$f_{bla,clo}$ [%]	f_{clo} [%]	m_{tot} [g/m ²]	m_{clo} [$\frac{g}{m^2}$]	I_{cl} [$\frac{m^2K}{W}$]
A) Langärmelige Kleidung, Multikomponentendecke aus Polyester und Baumwolle, halb bedeckt	0.90	0.40	0.90	285	140	1.56
B) Langärmelige Kleidung, Multikomponentendecke aus Polyester und Baumwolle, vollständig bedeckt	0.95	0.85	0.95	285	140	2.11
C) Kurzärmelige Kleidung, Multikomponentendecke aus Polyester und Baumwolle, halb bedeckt	0.80	0.20	0.70	138	125	1.21
D) Kurzärmelige Kleidung, Multikomponentendecke aus Polyester und Baumwolle, vollständig bedeckt	0.95	0.60	0.70	16	125	2.02

6.2. Anforderungen und Besonderheiten spezieller Nutzergruppen

Das Raumklimaempfinden der Krankenhauspatienten kann neben den Isolationsgraden von Bett und Bekleidung auch durch deren Gesundheitszustand, Alter etc. vom Empfinden gesunder Personen abweichen. Nachfolgend sind die möglichen Nutzereigenschaften bzw. Nutzergruppen aufgestellt und deren Einfluss auf die Raumklimaempfindung nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand erläutert.

6.2.1. Neugeborene, Säuglinge und Kleinkinder

Ein Neugeborenes verfügt bereits über ein funktionierendes Thermoregulationssystem. Dieses ist jedoch in seiner Leistungsfähigkeit eingeschränkt. Unterschiede zum Erwachsenen bestehen unter anderem in einem größeren Oberflächen- Massen- Verhältnis, einer dünneren Isolier- bzw. Hautschicht, einer abweichenden Wärmeezeugung (Braunes Fett bei Kleinkindern) und einer eingeschränkten Transpirationskapazität. [Parsons, 2003] [Robertshaw, 1981] [Clark u. Edholm, 1985]

Bei niedrigen vorherrschenden Umgebungstemperaturen wirken sich für Neugeborene das relativ große Oberflächen- Volumenverhältnis², die geringe Isolierschicht um den Körperkern³ und die erhöhte Verdunstung ungünstig aus und führen zu erhöhten Wärmeverlusten. Kleinkinder weisen zudem, je früher sie geboren wurden, eine umso geringere metabolische Wärmeezeugung auf und im Gegensatz zu erwachsenen Personen wird zusätzliche Wärme bei Kälteereignissen nicht aus dem Muskelzittern sondern aus dem Braunen Fett generiert. [Robertshaw, 1981]

Bei hohen Umgebungstemperaturen wirkt sich die reduzierte Transpirationskapazität von Kleinkindern auf den Toleranzbereich aus. Die Schweißdrüsen sind mit der Geburt bereits angelegt und im Laufe des Lebens werden keine neuen Schweißdrüsen gebildet. Die Drüsendichte und damit die potenzielle Schweißkapazität pro Oberflächeneinheit wäre daher deutlich größer als bei Erwachsenen und nähme mit zunehmendem Alter der Kinder ab. Des Weiteren ist die potenzielle Sekretionskapazität der einzelnen Drüsen bei Kleinkindern höher als bei Erwachsenen und der

²Dieser Umstand ist insbesondere bei Kindern mit einer Körperoberfläche $A_{Du} < 0.5 \text{ m}^2$ gegeben.

³Kleinkinder weisen eine sehr geringe Hautschichtdicke und wenig subkutanes Fett auf. Hautfaltenmessungen von ergaben etwa die Hälfte ($\approx 10 \text{ mm}$) der Hautdicken von Erwachsenen ($\approx 24 \text{ mm}$). siehe [Tsunami-Hayakawa u. a., 1995, S.13]

6. Nutzeranforderungen und Bewertungsmodelle

Körper weist ein hohes Oberflächen- Massen- Verhältnis auf. Diese anatomischen Vorteile können allerdings nur begrenzt genutzt werden, da Kleinkinder während der ersten Lebenstage lediglich über die Kopfhaut transpirieren können und erst später an Rumpf und Gliedmaßen. Ebenso sinkt die Schwellentemperatur für das Einsetzen des Schwitzens mit zunehmendem Lebensalter der Kleinkinder, d.h. je jünger das Kind ist, desto zeitverzögerter setzt das Schwitzen bei ansteigenden Umgebungstemperaturen ein. [Robertshaw, 1981] [Clark u. Edholm, 1985]

Untersuchungen zum optimalen Raumklima für Kleinkinder wurden vornehmlich für den Betrieb von Inkubatoren durchgeführt. Für diese Umgebungen werden hohe Neutraltemperaturen von etwa 32°C ermittelt, was auch darauf zurückzuführen ist, dass diese Kinder nahezu unbedeckt sind. [Clark u. Edholm, 1985]

Leider gibt es wenige Messungen und Untersuchungen zur Wärmeemission von Kindern. Parsons empfiehlt als erste Annäherung die in der Norm ISO 8996 angegebenen Werte für Erwachsene, korrigiert um die Oberflächenwerte von Kindern. [Parsons, 2003, S. 148]

Für die Raumklimaschwankungstoleranz ist auf Grund des eingeschränkten Leistungsvermögens des Thermoregulationssystems von Kleinkindern davon auszugehen, dass der Akzeptanzbereich umso enger ist, je jünger das Kleinkind ist. Das gilt sowohl für Kälte- als auch für Hitzeexposition. [Robertshaw, 1981], [Parsons, 2003]

6.2.2. Senioren

Die Thermoregulationsprozesse des Körpers werden mit fortschreitendem Alter ineffizienter. Das ist vorrangig auf die allgemeine Verschlechterung der körperlichen Fitness und die damit im Zusammenhang stehende Belastungserhöhung für das Herz- und Gefäßsystem bei körperlicher Aktivität zurückzuführen. Aus diesem Grund besitzt das Herz- und Gefäßsystem älterer Menschen bei Belastung eine geringere Reservekapazität zur Gewährleistung der Thermoregulationsprozesse. Das führt dazu, dass ältere Menschen dazu neigen, thermischen Stress, d.h. Hitze- und Kältebelastungen zu vermeiden. Das fehlende Belastungstraining wirkt sich nochmals verschlechternd auf die Akklimatisierungseffizienz aus. Die Folge ist eine Verschlechterung der Verdunstungs- und Schweißkapazität, der Gefäßaktivität (Gefäßverengung und -erweiterung), des Muskelzitterns und der Herz- und Gefäßsystemstabilität. [Robertshaw, 1981], [Havenith, 2001], [Parsons, 2003] Zudem kann ein Zusammenhang

6.2. Anforderungen und Besonderheiten spezieller Nutzergruppen

zwischen Körperkerntemperatur, Temperaturempfindung, Grundumsatz (metabolische Wärmeproduktion) und dem Alter festgestellt werden. Je älter eine Person ist, desto geringer ist ihre Wärmeproduktion sowie Körperkerntemperatur und desto schlechter kann sie Temperaturveränderungen wahrnehmen. [Robertshaw, 1981, S. 175], [Parsons, 2003]

Bei Kälteexposition zeigt sich eine weitere Abweichung von älteren zu jüngeren Personen. Während die Kerntemperatur jüngerer Personen weitestgehend konstant gehalten wird, sinkt sie bei älteren Personen bereits ab Umgebungstemperaturen von 17°C rapide ab. [Robertshaw, 1981, S.174] Hinzu kommen die eingeschränkten Regulationsmechanismen (Vasokonstriktion, Muskelzittern) und die verminderte Thermosensibilität älterer Menschen. Beides begünstigt Hypothermie, d.h. Unterkühlung. [Robertshaw, 1981]

Im Falle einer Hitzeexposition macht sich bei älteren Menschen vor allem die reduzierte Verdunstungs- und Schweißkapazität bemerkbar. Die Schwellentemperatur des Schwitzens liegt höher und die Sekretionsrate⁴ liegt niedriger als bei jüngeren Personen. Aus diesem Grund ist für Ältere auch die Gefahr einer Hyperthermie, d.h. Überhitzung, erhöht. [Robertshaw, 1981, S. 176]

Auf Grund der abweichenden physiologischen Voraussetzungen liegt die Vermutung nahe, dass ältere Menschen grundsätzlich andere Behaglichkeitsbedingungen wünschen als jüngere Personen. Klimakammerstudien unter genormten Randbedingungen kommen jedoch zur Erkenntnis, dass es unter gleichen physiologischen Voraussetzungen keine wesentlichen Unterschiede gibt.⁵ [Fanger, 1970], [Havenith, 2001]

Untersuchungen unter praktischen Bedingungen, d.h. unter Berücksichtigung physiologischer und verhaltensbedingter Unterschiede, ergaben hingegen sehr unterschiedliche Resultate. Das kann unter anderem darauf zurückgeführt werden, dass es große individuelle Unterschiede in Bezug auf die Stoffwechselraten, die körperliche Fitness und Bekleidungsgewohnheiten gibt. [Havenith, 2001] [vanHoof u. Hensen, 2006]

Schlussfolgernd kann davon ausgegangen werden, dass sich unter praktischen Bedingungen die abnehmende Stoffwechselaktivität, ein verschobener thermischer Tag-

⁴Die Sekretionskapazität nimmt vor allem an den Extremitäten ab. [Robertshaw, 1981, S. 176]

⁵Voraussetzung dieser Studien ist eine Erfassung folgender Eigenschaften der Versuchspersonen: Bekleidungsisolierung, Aktivität (Metabolische Rate), Körpercharakteristik (Größe, Konstitution, Fitness).

6. Nutzeranforderungen und Bewertungsmodelle

Nacht- Rhythmus, die ineffizienteren Regulationsmechanismen (Gefäßverengung, Gefäßerweiterung, Schwitzen, Muskelzittern) sowie die verzögerte und verminderte Wahrnehmung einer Abweichung der Umgebungsbedingungen vom Optimum über eine geringere Toleranz älterer Menschen gegenüber Schwankungen des Raumklimas bemerkbar machen. [vanHoof u. Hensen, 2006] [Parsons, 2003] [Robertshaw, 1981] [ISO/TS 14415, 2005]

6.2.3. Personen unter Medikamenteneinfluss

Neben diesen altersbedingten Faktoren spielen im Alter krankheits- und behinderungsbedingte Faktoren eine zunehmende Rolle. In diesem Zusammenhang sind Medikamente von Bedeutung. Sie können sich auf die thermische Empfindung und Reaktionsfähigkeit auswirken. Einige Stoffe beeinflussen die metabolische Wärmeproduktion, andere bewirken Veränderungen der Körperkerntemperatur, Gefäßverengung oder Gefäßerweiterung. Blutgefäßerweiternde Mittel stören beispielsweise die periphere vasomotorische Regulierung, d.h. die Durchblutung der äußeren Körperteile. Das wirkt sich verschlechternd auf das thermische Empfindungs- und Steuerungsvermögen aus. In vielen Fällen wird der Einfluss eines Medikaments durch andere Stoffe wie z.B. Alkohol verstärkt. Einige Medikamente und deren Auswirkungen wurden aus [Parsons, 2003, S. 153, Tab. 6.9 und 6.10] entnommen und in Tabelle 6.3 aufgelistet.

Es ist aus dieser Übersicht zu erkennen, dass die Mehrzahl der Medikamente dämpfend auf die Thermoregulation und die thermische Empfindung wirkt und damit eine Überhitzung (und auch Unterkühlung) des Körpers begünstigt. Für Personen unter Medikation sollten Abweichungen vom Raumklimaoptimum daher vermieden werden.

6.2.4. Personen mit Krankheiten und Behinderungen

Eine Übersicht signifikanter Thermoregulationsstörungen infolge von Behinderungen und Krankheiten wird derzeit vom Internationalen Normungsausschuss aufbereitet. Zu diesen Beeinträchtigungen gehören Lähmungserscheinungen (z.B. durch Rückenmarksverletzungen oder Zerebralparese⁶) und Kreislauferkrankungen. Laut dieser

⁶Darunter ist eine Erkrankung zu verstehen welche mit motorischen Einschränkungen (leichte Einschränkungen bis hin zu Lähmungen) und oftmals auch mit Epilepsie, Verhaltensstörungen u.a.

6.2. Anforderungen und Besonderheiten spezieller Nutzergruppen

Tabelle 6.3.: Übersicht über die Einflüsse einiger Medikamente auf das Thermoregulationssystem

Wirkstoff	Beeinflussungsmechanismus in warmen Umgebungen
Antidepressiva	Reduzierte Wahrnehmung der Umgebungstemperatur, in hohen Dosen Begünstigung von Überhitzung (Hyperthermie), Verstärkung durch andere Mittel wie z.B. Amphetamine
Hypnotika	Dämpfung des zentralen Nervensystems, Absenkung der Körperkerntemperatur in heißen Umgebungen, Effektverstärkung durch Alkohol
Psychopharmaka	Begünstigung von Hyperthermie in warmen Umgebungen, zentrale Beeinflussung des Thermoregulationssystems und der peripheren Steuerungsmechanismen
Morphine	In geringen Dosen Begünstigung von Überhitzung (Hyperthermie)
Amphetamine	Stimulation des zentralen Nervensystems, Gefäßverengung, erhöhte periphere Wärmeerzeugung
Anästhetika	Dämpfung der Thermoregulationszentren im zentralen Nervensystem, Begünstigung von Überhitzung (Hyperthermie)

Übersicht führen Lähmungen der unteren oder gar aller Extremitäten (Paraplegie bzw. Quadriplegie) zu einer eingeschränkten Transpirationskapazität und Vasomotorik der betroffenen Körperpartien. Betroffene sind daher stärker durch Hyperthermie und deren Folgen (Hitzeschlag, Hitzeerschöpfung) gefährdet als andere Personengruppen. Für eine Vielzahl anderer Erkrankungen mit Beeinträchtigung des Herzkreislaufsystems werden in der Studie vornehmlich Temperaturschwankungen als Risikofaktoren benannt. [ISO/TS 14415, 2005]

Webb und Parsons kommen auf Grund von Klimakammerstudien mit behinderten und nicht- behinderten Menschen zu der Erkenntnis, dass es in einer Gesamtheit von Befragten keine signifikanten Unterschiede in der Bewertung des Umgebungsklimas zwischen Menschen mit und ohne Behinderung gibt. Es stellte sich eine größere Variation der Bewertungsmaße für den kühlen Bereich und eine geringere Variation für den warmen Bereich als in der Referenzgruppe dar. [Parsons, 2003, S. 231]

einhergeht. [Andreae, Susanne: „Lexikon der Krankheiten und Untersuchungen [die 1000 wichtigsten Krankheiten und Untersuchungen]“, 2. Auflage, Thieme Verlag Stuttgart, 2008.]

6. Nutzeranforderungen und Bewertungsmodelle

In Klimakammer- und Feldstudien der Loughborough University wurde der Einfluss der Behinderungsart auf die Empfindung näher untersucht. Die Feldstudien führten zu der Erkenntnis, dass die Mehrzahl der Betroffenen wärmere Umgebungstemperaturen und dementsprechend wärmere Bekleidung bevorzugt als vor dem Eintreten der Behinderung. Aus den Klimakammerstudien ergaben sich je nach Erkrankungsfall unterschiedliche Vorzugstemperaturbereiche von 23°C bis 27°C (Rückenmarksverletzungen, halbseitige Lähmungen) sowie 23°C bis 29°C (Gelenkrheumatismus, Polio). [Parsons u. Webb, 1999]

6.2.5. Zusammenfassung der thermoregulatorischen Besonderheiten unterschiedlicher Nutzertypen

Für eine Abschätzung der praktischen Raumklimatoleranzen unterschiedlicher Nutzergruppen sind physiologische Kennwerte erforderlich. Diese konnten lediglich für unterschiedliche Altersgruppen und nicht für unterschiedliche Krankheitsbilder, Medikationen oder Behinderungen recherchiert werden. In Tabelle 6.4 wurden einige Besonderheiten der unterschiedlichen Altersgruppen Kleinstkinder (KK), Kinder (K), Kinder und Jugendliche (KJ), Erwachsene (E) und Ältere Menschen (Ä) zusammengetragen. Diese Angaben bilden die Grundlage für die später folgende Anpassung der allgemeinen Wärmebilanzgleichungen auf unterschiedliche Nutzergruppen.

Zur Berechnung der Hautoberfläche wurden die Gleichung von [Haycock u. a., 1978] angewandt. Sie bezieht sich auf die Eingabewerte Körpergewicht \bar{w} (kg), Körperhöhe \bar{h} (cm) und kann für die oben genannten Altersgruppen angewandt werden.

$$A_{sur,Ha} = \bar{w}^{0.5378} \cdot \bar{h}^{0.3964} \cdot 0.024265 \quad [m^2] \quad (6.2)$$

Die in der nachfolgenden Übersichtstabelle 6.4 gelisteten Werte der Körperkerntemperatur θ_{cr} [$^{\circ}\text{C}$] und der Hauttemperatur θ_{sk} [$^{\circ}\text{C}$] für Erwachsene beziehen sich auf Klimakammerexperimente von [Wagner u. a., 1974] und wurden für einen thermisch neutralen Raumklimazustand⁷ ermittelt. Die Schweißsekretionsraten SK_{Fo} [$\frac{g}{m^2h}$] für Erwachsene beziehen sich auf Versuchsergebnisse nach [Foster u. a., 1976] und sind

⁷Im Experiment wurden Versuchspersonen der aufgeführten Altersgruppen für ca. eine Stunde einer Umgebung mit einer Lufttemperatur von 30°C in leichter Bekleidung und auf einem Bett liegend ausgesetzt. Die entnommenen Werte beziehen sich auf den Oberkörper (Abdomen). [Wagner u. a., 1974]

6.2. Anforderungen und Besonderheiten spezieller Nutzergruppen

jeweils für Frauen (niedrigerer Wert) und Männer angegeben⁸. [Foster u. a., 1976, S. 95] Die Temperaturangaben für Kinder (K 1-4) wurden, ebenso wie die Schweißraten [Tsuzuki-Hayakawa u. a., 1995] entnommen.⁹

⁸In diesem Versuch wurden zwei Gruppen untersucht, die über und die unter 75-jährigen. Die Altersspanne der ersten Gruppe umfasst 18 bis 65-Jährige, jene der zweiten Gruppe 70 bis 94-Jährige. Die Werte beziehen sich auf die hautflächengemittelte Transpirationsrate.

⁹Die Untersuchungen beziehen sich auf Kinder in der Altersspanne von ca. 1 Jahr bis 4 Jahre. Sie wurden im Wechsel einer neutralen und einer warmen Umgebung ausgesetzt. Es erwiesen sich deutlich höhere Hauttemperaturen für die Kleinkinder in allen Umgebungen sowie ein starker Anstieg der Kerntemperatur in der warmen Umgebung. Auch hier beziehen sich die Werte auf das Abdomen. [Tsuzuki-Hayakawa u. a., 1995]

6. Nutzeranforderungen und Bewertungsmodelle

Gruppe	Gewicht	Größe	Körperoberfläche	Körperkern-temperatur	Hauttemperatur	Grundumsatz	Schweißabgabe
KK < 1	$\bar{w} = 8 \text{ kg}$	$\bar{h} = 65 \text{ cm}$	$A_{sur} = 0.39 \text{ m}^2$	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben
K 1-4	$\bar{w} = 12 \text{ kg}$	$\bar{h} = 85 \text{ cm}$	$A_{sur} = 0.54 \text{ m}^2$	$\theta_{cr} \approx 37.4^\circ\text{C}$	$\theta_{sk} \approx 35.2^\circ\text{C}$	keine Angaben	$SR_{Ts} \approx 113.4 \frac{\text{g}}{\text{m}^2\text{h}}$
K 7-9	$\bar{w} = 35 \text{ kg}$	$\bar{h} = 125 \text{ cm}$	$A_{sur,Ha} = 1.11 \text{ m}^2$	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben
K 10-13	$\bar{w} = 45 \text{ kg}$	$\bar{h} = 145 \text{ cm}$	$A_{sur} = 1.35 \text{ m}^2$	$\theta_{cr} \approx 37.5^\circ\text{C}$	$\theta_{sk} \approx 35.0^\circ\text{C}$	$Q_{met} \approx 49 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	keine Angaben
K 14-16	$\bar{w} = 60 \text{ kg}$	$\bar{h} = 165 \text{ cm}$	$A_{sur,Ha} = 1.66 \text{ m}^2$	$\theta_{cr} \approx 37.3^\circ\text{C}$	$\theta_{sk} \approx 34.5^\circ\text{C}$	$Q_{met} \approx 48 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	keine Angaben
E 20-29	$\bar{w} = 75 \text{ kg}$	$\bar{h} = 175 \text{ cm}$	$A_{sur} = 1.91 \text{ m}^2$	$\theta_{cr} \approx 37.0^\circ\text{C}$	$\theta_{sk} \approx 34.0^\circ\text{C}$	$Q_{met} \approx 41 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	$SR_{Fo} \approx 55.8/88.8 \frac{\text{g}}{\text{m}^2\text{h}}$ $SR_{Ts} \approx 60.7 \frac{\text{g}}{\text{m}^2\text{h}}$
Ä 46-67	$\bar{w} = 75 \text{ kg}$	$\bar{h} = 175 \text{ cm}$	$A_{sur,Ha} = 1.91 \text{ m}^2$	$\theta_{cr} \approx 36.9^\circ\text{C}$	$\theta_{sk} \approx 33.5^\circ\text{C}$	$Q_{met} \approx 36 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	$SR_{Fo} \approx 55.8/88.8 \frac{\text{g}}{\text{m}^2\text{h}}$
Ä > 70	$\bar{w} = 75 \text{ kg}$	$\bar{h} = 170 \text{ cm}$	$A_{sur,Ha} = 1.83 \text{ m}^2$	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	$SR_{Fo} \approx 6.6/34.2 \frac{\text{g}}{\text{m}^2\text{h}}$

Tabelle 6.4.: Übersicht über die physiologischen und thermoregulatorischen Unterschiede verschiedener Altersgruppen. [KK: Kleinkind, K: Kind, E: Erwachsener, Ä: Älterer]

6.2.6. Ergebnisse praktischer Studien zum Raumklimaoptimum

Die nachfolgenden Untersuchungen zur Raumklimabewertung in Krankenhäusern bzw. Patientenzimmern bestehen aus der Erfassung der Raumklimaparameter (Lufttemperatur, Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit, Raumluftfeuchte), der Patienteneigenschaften (Bekleidung, Aktivität) sowie einer Befragung der Patienten. Die befragten Personen wurden dazu angehalten, das Raumklima nach ASHRAE-Komfortskala¹⁰ zu bewerten. In der Auswertung wurden die Raumklimaparameter den zu untersuchenden Faktoren (z.B. Alter) gegenübergestellt und über eine lineare Regressionsanalyse deren Abhängigkeit voneinander festgestellt.

In der britischen Studie der Autoren [Smith u. Rae, 1977] wurde schwerpunktartig der optimale Temperaturbereich für Patienten untersucht¹¹. Es erwies sich eine geringe Abhängigkeit der Behaglichkeitsansprüche von der relativen Luftfeuchtigkeit (zwischen 30 und 70 %), von Luftgeschwindigkeiten unter $0.1 \frac{m}{sec}$ sowie eine leichte Abhängigkeit von den äußeren Witterungsbedingungen. Als optimalen Temperaturbereich ermittelten die Autoren 21.5 bis 22.0 °C.

Die taiwanesische Feldstudie der Autoren [Hwang u. a., 2007] legte den Fokus auf die Untersuchung des Zusammenhanges zwischen Temperaturpräferenzen und Gesundheitszustand der Patienten¹². Es zeigte sich ein unerwartet großer Behaglichkeitsbereich sowie eine geringe Abhängigkeit der Behaglichkeitsempfindung von der relativen Luftfeuchtigkeit, dem Alter und dem Geschlecht. Der Gesundheitszustand wurde hingegen als signifikanter Einflussfaktor benannt. Patienten mit einem schlechten Gesundheitszustand präferierten um 0.3 K höhere Temperaturen als gesunde Personen. Die optimale Raumlufttemperatur der Patientengruppe wird von Hwang mit 22.9 °C im Winter sowie 24.0 °C im Sommer angegeben. [Hwang u. a., 2007]

¹⁰Diese Bewertungsskala besteht aus sieben Bewertungsmaßen. Dem neutralen Empfindungsbereich wird der Wert Null zugeordnet. Warme Umgebungsklimate können bis zu einem Wert von +3 (sehr heiß) eingeordnet werden, kalte Umgebungsbedingungen bis zu einem Wert von -3 (sehr kalt). Der optimale Bereich sollte innerhalb des Betragswertes 1 der Skala liegen.

¹¹In dieser Studie wurden Messungen und Befragungen in mehreren nicht klimatisierten Patientenzimmern über eine Dauer von zwei Tagen durchgeführt. Die Lufttemperaturen variierten zwischen 18 und 26 °C und die relativen Luftgeschwindigkeiten zwischen 0.03 und $0.08 \frac{m}{sec}$. Das Alter der insgesamt ca. 600 Patienten variierte zwischen ca. 10 und 80 Jahren. [Smith u. Rae, 1977, S. 19].

¹²Im Rahmen dieser Studie wurden ca. 900 Befragungen in einem taiwanesischen Krankenhaus durchgeführt, welches im Sommer mit einer Kühlanlage und im Winter ohne Heizungsanlage betrieben wird. Die Bedingungen schwankten im Bereich von 40 bis 80 % relative Luftfeuchtigkeit und 18 bis 26 °C. [Hwang u. a., 2007]

6. Nutzeranforderungen und Bewertungsmodelle

Eine schwedische Untersuchung der Autoren [Skoog u. a., 2005] betrachtet vornehmlich die Unterschiede in den Raumklimapräferenzen der verschiedenen Krankenhausnutzer.¹³ Für den Sommerfall konnte eine durchschnittliche Aktivität von 2.5 *met*¹⁴ für die Angestellten sowie 1.1 *met* für die Patienten ermittelt werden. Der sommerliche Bekleidungsfaktor betrug 0.57 für die Angestellten sowie 0.52 für die Patienten. Er wurde durch Befragung ermittelt. Der Wert lässt vermuten, dass entweder keine bettlägerigen Patienten befragt wurden oder das Bettsystem keine Berücksichtigung fand. Aus dieser Veröffentlichung ergibt sich für Patienten und Personal eine Optimaltemperatur von 22.4 °C.

Die Erhebung von [Khodakarami u. Knight, 2008] zielte auf die praktischen Temperaturverhältnisse in iranischen Krankenhäusern ab, ohne die Raumklimabewertung der Patienten zu erfragen¹⁵. Die ermittelten Bekleidungs- und Bettsystemisoliationsgrade belaufen sich auf 0.49 bis 1.39 *clo*¹⁶, die Aktivitätsgrade auf 0.70 bis 0.82 *met*. Erkenntnisse zu den optimalen Lufttemperaturen gehen lediglich aus den Berechnungen des PMV- Index vor und belaufen sich auf 24.0 bis 26.0 °C . [Khodakarami u. Knight, 2008, S. 188]

Eine weitere Studie der Autoren [Verheyen u. a., 2011] ermittelte die Raumklimabewertungsmaße der Patienten in Bezug auf deren Gesundheitszustand und deren Stationszugehörigkeit.¹⁷ Die erfragten Isoliationsgrade der Bekleidung liegen zwischen 1.4 und 2.2 *clo* und beinhalten das Bettsystem, die Aktivitätsgrade zwischen 0.7 und 1.2 *met*. Im Ergebnis der Studie werden keine optimalen Raumtemperaturen angegeben. Es findet eine Gegenüberstellung der berechneten (PMV) und der erfragten Zufriedenheit statt. Diese gelangt zu dem Ergebnis, dass weniger Personen mit dem Raumklima unzufrieden sind (5%), als die Berechnung (29 %) erwarten lässt. [Verheyen u. a., 2011]

¹³In dieser Studie wurden 35 Patienten und 40 Angestellte in einem schwedischen Krankenhaus untersucht. Die Raumlufttemperatur betrug während der Sommerphase der Untersuchung durchschnittlich 21.5 bzw. 21.4 °C, die relative Luftfeuchte 43 bis 46.2 %. [Skoog u. a., 2005]

¹⁴*met* wird als Einheit für die körperliche Wärmeerzeugung verwendet. Diese Einheit entspricht etwa der Wärmeabgabe eines erwachsenen Menschen im Ruhezustand und bezogen auf die Hautoberfläche, ca. $58 \frac{W}{m^2}$. [Parsons, 2003, S.133 ff.]

¹⁵Die Studie wurde während des Sommers 2005 in fünf verschiedenen Krankenhäuser in Ilam und mit 56 Patienten durchgeführt. [Khodakarami u. Knight, 2008]

¹⁶*clo* wird als Einheit für den thermischen Widerstand der Bekleidung verwendet. Eine Einheit entspricht dabei dem Widerstand, welcher eine warme Innenraumbekleidung (lange Unterwäsche, Anzug) erzeugt, d.h. ca. $0.16 \frac{m^2}{KW}$.

¹⁷Diese Studie wurde in einem belgischen Krankenhaus an ca. 100 Patienten unterschiedlicher Stationen während des Winters durchgeführt.

6.2. Anforderungen und Besonderheiten spezieller Nutzergruppen

Die Feldstudie von [Yau u. Chew, 2009] befasst sich mit den Behaglichkeitsbedürfnissen des Personals unter tropischen Außenklimabedingungen sowie mit der Aussagefähigkeit des PMV- Modells unter diesen Bedingungen¹⁸. In der Studie wurden eine optimale Temperatur von 26.4 °C sowie ein akzeptabler Temperaturbereich von 25.2 bis 28.2°C ermittelt. Die Aktivitäten der Befragten wurden in Gruppen zwischen 1.0 und 3.0 *met* eingeteilt, die observierten Bekleidungsgrade schwankten zwischen 0.54 und 1.01 *clo*. Die Aussagefähigkeit des PMV- Modells wird als gering bewertet und nicht für die Anwendung auf Krankenhausbauten empfohlen. [Yau u. Chew, 2009]

Autoren, Ort, Jahr der Studie	Zielgruppe	Vorzugsbereich
Smith u. Rae, 1977, England	Patienten	21.5 bis 22.0°C
Hwang u. a., 2007, Taiwan	Patienten	24.0°C
Skoog u. a., 2005, Schweden	Patienten, Angestellte	22.4°C
Khodakarami u. Knight, 2008, Iran	Patienten	24 bis 26°C
Verheyen u. a., 2011, Belgien	Patienten	keine Angaben
Yau u. Chew, 2009, Malaysia	Angestellte	25.2 bis 28.2°C

Tabelle 6.5.: Ergebnisse praktischer Studien zu Komfortansprüchen in Krankenhäusern

Es ist zu erkennen, dass die Vorzugstemperaturen der europäischen Studien (ca. 22.0°C) geringer sind als die Vorzugstemperaturen aus heißen Ländern (ca. 24.0 – 28.0°C). Da für die erhobenen Bekleidungskennwerte geringere Werte angegeben sind, ist dieser Unterschied sehr wahrscheinlich darauf und eventuell noch weitere Verhaltensunterschiede zurückzuführen.

6.2.7. Ergebnisse praktischer Studien zum erträglichen Raumklima

Neben diesen Studien zur Erfassung des optimalen Temperaturbereichs gibt es auch Studien zur Ermittlung des erträglichen Temperaturbereichs. Diese sind zum Teil in Folge großer Hitzeperioden (Europa 2003, Chicago 1999 u.a.) und der damit in Verbindung stehenden Mehrsterblichkeit durchgeführt worden. Einige dieser Untersuchungen stellen die im langjährigen Durchschnitt zu erwartende Sterblichkeit der

¹⁸Die Studie umfasst Messungen in vier verschiedenen malaysischen Krankenhäusern sowie Befragungen von 114 Personen. [Yau u. Chew, 2009]

6. Nutzeranforderungen und Bewertungsmodelle

in der betreffenden Phase aufgetretenen Sterblichkeit gegenüber. Die so ermittelte Mehrsterblichkeit kann anschließend einem Außenklimakennwert gegenübergestellt werden. Dafür bieten sich unter anderem der Hitzeindex HI ¹⁹ und der gleitende Mittelwert der Außenlufttemperatur θ_{RM} ²⁰ an. [Naughton u. a., 2002], [Fouillet u. a., 2006], [Hoffmann u. a., 2008]

Ein drastischer Anstieg der Mehrsterblichkeit kann in diesen Studien mit Hitzeindizes von $HI > 30^{\circ}C$ [Naughton u. a., 2002, S. 222, Abb.1, Schätzung aus der Grafik] bzw. maximalen kurzzeitigen Außenlufttemperaturen $\theta_{e,max} > 33 - 34^{\circ}C$ und gleitende Außenlufttemperaturen $\theta_{RM,2d} > 25 - 27^{\circ}C$ ([Fouillet u. a., 2006, S. 18, Abb. 1, Schätzung aus der Grafik] bzw. einem Zweitages- Hitzeindex von $HI_{2d} > 27^{\circ}C$ bzw. einer Außenlufttemperatur von $\theta_{e,max} > 28^{\circ}C$ ([Hoffmann u. a., 2008, S. 763, Angabe 1. Abs.]) in Verbindung gebracht werden.

6.2.8. Zusammenfassung der Besonderheiten spezieller Nutzertypen

Krankenhauspatienten unterscheiden sich sowohl in ihren allgemeinen Kennwerten, als auch in ihren thermoregulatorischen Eigenheiten von gesunden Personen. Allgemeine Eigenschaftsunterschiede bestehen in der verminderten metabolischen Wärmeerzeugung in Folge des schlechteren Gesundheitszustandes sowie in der Wirkung des Bettsystems. Spezielle Besonderheiten sind für unterschiedliche Patiententypen in Form von alters-, krankheits-, medikament- und behinderungsbedingten Veränderungen gegeben.

In Bezug auf die Raumklimaempfindung stellt das Bettsystem eine beachtliche Isolierschicht dar und behindert damit die Wärmeabgabe. Diesem Effekt steht die reduzierte Wärmeerzeugung von Patienten gegenüber. Medikamente können sich, ebenso wie Krankheiten und Behinderungen, sowohl reduzierend als auch erhöhend auf die Vorzugstemperaturen auswirken. Zur Quantifizierung dieser Einzelanforderungen sind weitere Untersuchungen notwendig. Insbesondere steht die Erhebung von Eingangsdaten zur Abbildung der körperlichen Besonderheiten unterschiedlicher Krankheitsbilder in den Wärmebilanzgleichungen aus. So müssten beispielsweise die Auswirkungen von Krankheiten auf den Lungenförderstrom oder auf die

¹⁹Dieser entspricht etwa der um $2^{\circ}C$ reduzierten maximalen Außenlufttemperatur des Tages. Er berücksichtigt auch die relative Luftfeuchtigkeit. [Fouillet u. a., 2006, Gleichung 1]

²⁰Darunter ist die über eine vor dem betreffenden Zeitpunkt liegende Zeitspanne von z.B. zwei Tagen ($\theta_{RM,2d}$) gemittelte Außenlufttemperatur gemeint.

6.2. Anforderungen und Besonderheiten spezieller Nutzergruppen

Schweißsekretion ermittelt werden. Die Auswirkung des Alters auf die thermische Empfindung ist hingegen erfasst worden. Es bestehen unter anderem Unterschiede in den Körpertemperaturen, der körperlichen Wärmeerzeugung und den Schweißsekretionsraten der unterschiedlichen Altersgruppen.

Insgesamt konnte resümiert werden, dass Patienten in besonderem Maße vor Temperaturschwankungen bewahrt werden müssen. Ein Hinweis darauf stellt die Mehrsterblichkeit unter Patienten und Älteren in Folge von Hitzephasen dar. Da die ermittelten Außenklimakennwerte der Studien zur Hitzemehrsterblichkeit nicht übereinstimmen und zudem keine Übertragbarkeit auf die vorherrschenden Raumklima- verhältnisse erlauben, sind daraus jedoch keine Grenzwerte ableitbar.

6.3. Nutzerbezogene Bewertungsmodelle

Der nachfolgende Abschnitt befasst sich mit ausgewählten Bewertungsmodellen zur Ermittlung des optimalen Raumklimas. Es werden gegenwärtig zwei Verfahrensansätze, die statischen und die adaptiven Verfahren, angewandt. Die statischen Verfahren basieren auf der Annahme, dass der menschliche Körper ein passiver Empfänger thermischer Signale aus der Umgebung ist. Die adaptiven Verfahren gehen im Gegensatz dazu von einem Anpassungsverhalten des Menschen an das Raumklima aus.

6.3.1. Auswertungsansatz

Nach Alexander von Humboldt umfasst der Begriff Klima alle Modifikationen der Atmosphäre von denen unsere Organe wahrnehmbar beeinflusst werden. Dazu gehören unter anderem die Temperatur, die (relative) Luftfeuchtigkeit, der Luftdruck, die Luftgeschwindigkeit. [von Humboldt, 1832]

Diese von Humboldt genannten Faktoren sind auch Hauptgegenstand der heutigen Behaglichkeitsbetrachtungen für das Innenraumklima. Wie Humboldt seinerzeit bemerkte, kommt der Temperatur dabei eine übergeordnete Bedeutung zu. Daher richten sich die Ansätze zur Optimalbereichs- und Grenzwertdefinition von Raumklimazuständen hauptsächlich auf den optimalen Temperaturbereich. Ein Beispiel ist die Einteilung durch Walther Liese in das Schon-, Reiz-, Last- und Indifferenzklima. Das Indifferenzklima entspricht nach Liese dem Klima, bei welchem "der raumklimatische Begleitumstand optimal gelöst" ist, d.h. dem behaglichen Raumklima. Lieses Eingrenzung der Raumlufttemperaturbereiche für das Indifferenzklima ist noch relativ ungenau und beschränkt sich auf die Angabe von Erfahrungswerten, einem Temperaturbereich "innerhalb von 18 bis 22°C". [Liese, 1970]

Ansätze für eine genauere Fassung des Komfortklima- bzw. Behaglichkeitsbereiches orientieren sich gemäß Humboldts Klimadefinition am Maß der Beeinflussung des menschlichen Organismus durch das Klima. Die ersten Bewertungsmethoden bezogen sich dahingehend auf statistische Datengrundlagen, welche auf ausgewählte Raumklimaparameter oder spezielle Lebensbereiche bezogen waren. In diesem Zusammenhang sind die Indizes für Hitze-arbeitsbedingungen zu nennen, beispielsweise der Wärmebelastungsindex (Heat-Stress-Index) von Belding und Hatch, der P4SR-

Index von McArdle und der Temperaturakzeptanzgrad (Thermal Acceptance Ratio) von Robinson. [Belding u. Hatch, 1955] [McArdle u. a., 1947] [Robinson u. a., 1945]

Spätere Bewertungsmodelle verfolgen den Ansatz, den Beeinflussungsgrad des Raumklimas aus der Wärmebilanz des Körpers abzuleiten. Diese Modelle gehen davon aus, dass die Raumklimaempfindung ein Resultat der passiven Reaktion des Thermoregulationssystems auf die vorherrschenden Bedingungen ist. Die Hauptunterschiede dieser statischen Modelle sind in ihrem Detaillierungsgrad und den Bezugswerten zu sehen. Die Bezugswerte wurden in den ersten Ansätzen aus dem Vergleich objektiv messbarer Größen (Raumklimaparameter, physiologische Parameter) mit subjektiven Bewertungen von Versuchspersonen abgeleitet. Als Untersuchungsumgebung dienten dafür künstlich erzeugte Raumklimabedingungen, in der Regel Klimakammern mit zeitkonstanten Bedingungen. So geht das Predicted- Mean- Vote- Modell von Fanger beispielsweise von nahezu unveränderlichen Raumklimaverhältnissen aus und beruht daher auf einer stationären physiologischen Wärmebilanz. Zudem wird das Unbehaglichkeitsmaß in diesem Ansatz aus der Bilanz aller unter behaglichen Raumklimabedingungen zu erwartenden Gewinne und Verluste abgeleitet. Andere Modelle wie beispielsweise das Thermal- Sensation- Value- (TSV) Modell von Azer & Hsu beruhen auf einer instationären physiologischen Wärmebilanz und leiten das Unbehaglichkeitsmaß aus konkreten physiologischen Kennwerten wie der Hauttemperatur ab. [Fanger, 1970] [Azer u. Hsu, 1977]

Ab den 1970er Jahren wurden in größerem Umfang Untersuchungen und Befragungen zur Behaglichkeitsempfindung unter praktischen Bedingungen durchgeführt. Die bisherigen Bewertungsmethoden erwiesen sich in diesem Zusammenhang, besonders für Gebäude mit starken Raumklimaschwankungen, als wenig aussagekräftig. So wurden Ansätze entwickelt, welche die Erwartungshaltung und die Einflussnahme der Gebäudenutzer auf das Raumklima mit berücksichtigten. Diese adaptiven Modelle setzen in den meisten Fällen eine direkte Abhängigkeit der zu erwartenden Raumklimabeurteilung von einem Außenklimakennwert voraus. Sie unterscheiden sich vorwiegend in der Auswahl und berücksichtigten Zeitperiode dieser Kennwerte.

6.3.2. Physiologische Wärmebilanz

Die statischen Modelle basieren auf der Wärmebilanz des Menschen. Es gibt sechs Hauptverlustprozesse, die der metabolischen Wärmeerzeugung gegenüber stehen. Diese Verlustanteile sind Wasserdampfdiffusion (Q_{Diff}) und Schwitzen (Q_{Sweat}) über die Hautoberfläche, Abstrahlung (Q_{Rad}) und konvektiver Wärmeverlust über Bekleidungs- und Hautoberflächen (Q_{Conv}) sowie latente und sensible Atmungswärmeverluste ($Q_{Resp,L}$, $Q_{Resp,S}$). Die übrigen Wärmeabgabeprozesse werden meist vernachlässigt, beispielsweise der Wärmeaustausch der Fußflächen mit dem Untergrund über Wärmeleitung oder der Wärmeaustausch über die Aufnahme von Nahrung und Getränke sowie über deren Ausscheidung. Abbildung 6.2 enthält eine Übersicht der wesentlichen Wärmebilanzanteile.

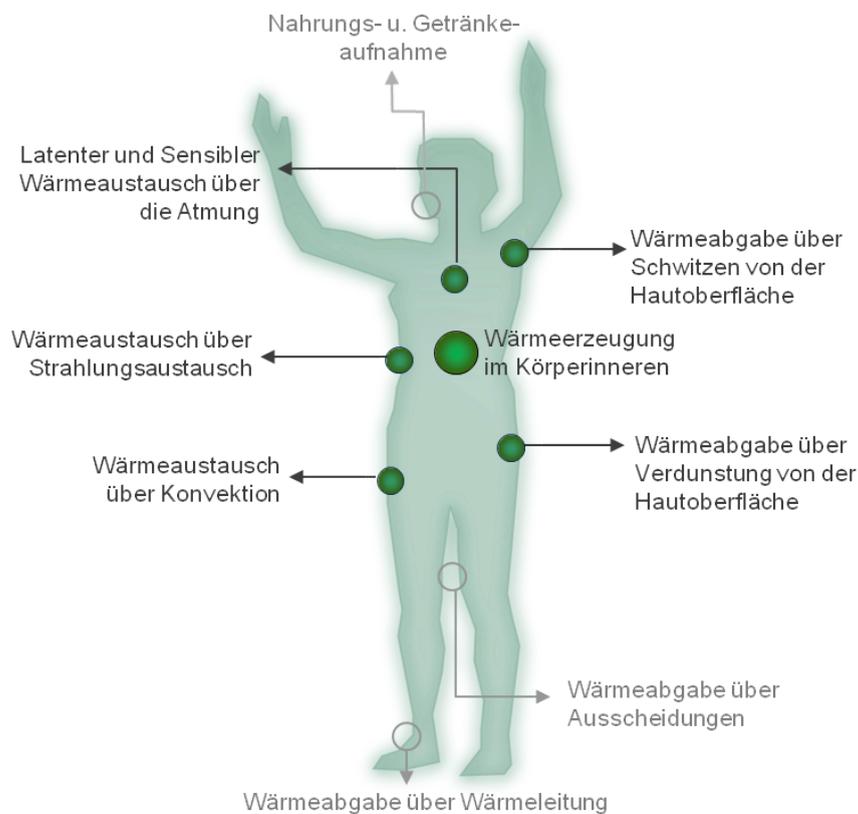


Abbildung 6.2.: Hauptanteile (grün) und untergeordnete Anteile (grau) der Wärmebilanz des menschlichen Körpers

Es existieren derzeit mehrere Modelle zur Berechnung der Wärmebilanz, welche sich

vor allem in der Detaillierung des Körpers unterscheiden. So behandelt Fanger den Körper als Gesamtheit, während das Zweiknotenmodell von Gagge & Stollwijk zwei Körperteile, die Hüllschicht und den Körperkern, betrachtet. Darüber hinaus existieren Mehrknotenmodelle in denen die Besonderheiten sämtlicher Körperteilbereiche erfasst werden²¹. [Fanger, 1967], [Gagge u. a., 1978], [Azer u. Hsu, 1977]

Die Energiebereitstellung im Körper ($Q_H [W]$) erfolgt durch Oxidationsprozesse. Der Hauptanteil der Energie steht dem Körper thermisch zur Verfügung ($Q_{Met} [W]$), ein geringerer Teil wird in mechanische Kraft umgewandelt ($Q_W [W]$). Dieser Anteil kann mit dem mechanischer Wirkungsgrad (η) angegeben werden. Er nimmt mit ansteigender körperlicher Aktivität zu. Er beträgt für leichte körperliche Tätigkeiten etwa 5% und kann für schwere Tätigkeiten auf bis zu 20% ansteigen. [Fanger, 1967, S. III.4.5]

Die Wärmeabgabe über Diffusion stellt einen Teil der latenten Wärmeverluste dar und ist nicht über das Thermoregulationssystem des Menschen ansteuerbar. Sie verhält sich proportional zur Differenz von Sättigungsdampfdruck auf der Hautoberfläche $P_{Sat}(\theta_{Sk}) [Pa]$ und Wasserdampfpartialdruck der Raumluft $P_{Par}(\theta_{I,Air}, \phi_{I,Air}) [Pa]$ sowie zur Wasserdampfdurchlässigkeit der Haut $\lambda_{Skin} [\frac{g_{water}}{hPa}]$. In der nachfolgenden Gleichung ist $\Delta Q_{Vap} [\frac{Wh}{g_{water}}$] die Verdunstungswärme des Wassers. [Fanger, 1967], [Gagge u. a., 1978], [Azer u. Hsu, 1977]

$$Q_{Diff} = \Delta Q_{Vap} \cdot \lambda_{Skin} \cdot (P_{Sat} - P_{Par}) \quad [W] \quad (6.3)$$

Die Verluste durch Schweißabgabe $Q_{Sweat} [W]$ sind aktiv über das Thermoregulationssystem des Körpers beeinflussbar. Befindet sich der Körper im thermischen Gleichgewicht, so tritt keine Schweißabgabe auf. Transpirationswärmeverluste sind ähnlich den Diffusionswärmeverlusten von der Schweißsekretionsrate $\dot{m}_{Sweat} [\frac{g_{Sweat}}{h}]$ und Verdunstungswärme des Schweißes bzw. Wassers $\Delta Q_{Vap} [\frac{Wh}{g_{Sweat}}$] abhängig. Zur Ermittlung der Schweißsekretionsrate werden empirische Modelle mit, je nach Ansatz, unterschiedlichen Bezugswerten eingesetzt. So verwenden Gagge und Azer&Hsu die Körperkerntemperatur als Hauptbezugswert während in Fangers Modell ausschließlich die Aktivität maßgebend ist. [Fanger, 1967], [Gagge u. a., 1978], [Azer

²¹Beispiele für diese Modelle sind : [Tanabe et al.: „Evaluation of Thermal Comfort using combined Multi- Node Thermoregulation and Radiation Models and Computational Fluid Dynamics“. Energy and Buildings. Vol. 34. 2003] sowie [Huizenga et al.: „A Model of human Physiology and Comfort for assessing complex thermal Environments“Energy and Buildings. Vol. 36. 2001]

6. Nutzeranforderungen und Bewertungsmodelle

u. Hsu, 1977]

$$Q_{Sweat} = \Delta Q_{Vap} \cdot \dot{m}_{Sweat} \quad [W] \quad (6.4)$$

Atmungsverluste treten in latenter und sensibler Form auf. Die latenten Verluste bezeichnen die feuchten Wärmeverluste $Q_{Res,L}$ [W] durch Anreicherung der eingeatmeten Luft mit Wasserdampf. Sie werden von der Atmungsfrequenz und dem Lungenvolumen bzw. dem Lungenförderstrom $\dot{V} [\frac{kgLuft}{h}]$ sowie der Wassergehaltsdifferenz zwischen der eingeatmeten $w_{in} [\frac{gWasser}{kgLuft}]$ und der ausgeatmeten $w_{ex} [\frac{gWasser}{kgLuft}]$ Luft bestimmt. Zur vereinfachten Ermittlung des Lungenförderstroms wird üblicherweise eine empirisch ermittelte Abhängigkeit von der Aktivität angesetzt. Die Berücksichtigung der latenten und sensiblen Atmungsverluste ist in nachfolgenden Modellen übereinstimmend. [Fanger, 1967], [Gagge u. a., 1978], [Azer u. Hsu, 1977]

$$Q_{Res,L} = \dot{V}_{Res} \cdot (w_{ex} - w_{in}) \cdot \Delta Q_{Vap} \quad [W] \quad (6.5)$$

Die trockenen bzw. sensiblen Atmungswärmeverluste $Q_{Res,S}$ werden in ähnlicher Form ermittelt. Sie ergeben sich ebenfalls aus dem Lungenförderstrom $\dot{V}_{Res} [\frac{kgLuft}{h}]$ sowie aus der Temperaturdifferenz zwischen eingeatmeter $\theta_{I,air}$ [°C] und ausgeatmeter Luft θ_{ex} [°C] und der spezifischen Wärmespeicherkapazität der Luft $c_{Air} [\frac{Wh}{kgK}]$. [Fanger, 1967], [Gagge u. a., 1978], [Azer u. Hsu, 1977]

$$Q_{Res,S} = \dot{V}_{Res} \cdot c_{Air} \cdot (\theta_{ex} - \theta_{I,air}) \quad [W] \quad (6.6)$$

Die trockene Wärmeübertragung von der Körperoberfläche an die Umgebung umfasst konvektive und radiative Verluste. Beide Verlustanteile werden in Bezug auf einen emittierende Körperoberfläche A_{Body} bezogen. Gemäß des Strahlungsgesetzes nach Stefan und Boltzmann ergeben sich die Strahlungsverluste aus der Differenz zwischen der Strahlungstemperatur der Umgebung θ_{rad} [°C] und der Temperatur der abstrahlenden Körper- bzw. Bekleidungsoberfläche θ_{Body} [°C] sowie einem mittleren Emissionsgrad ϵ_{Body} [-] und der Stefan- Boltzmann- Konstanten $\sigma_{StBo} = 5.6704 \cdot 10^{-8} [\frac{W}{m^2K^4}]$. In den Ansätzen nach Gagge und Fanger wird die Bekleidungsoberfläche als Abstrahlungsfläche betrachtet und deren Temperatur iterativ ermittelt. Azer/Hsu verwenden die Hauttemperatur als Bezugswert und berücksichtigen

sichtigen die Bekleidung als Übergangsfaktor. [Fanger, 1967], [Gagge u. a., 1978], [Azer u. Hsu, 1977]

$$Q_{Rad} = A_{Body} \cdot \epsilon_{Body} \cdot \sigma_{StBo} \cdot [(\theta_{Body} + 273)^4 - (\theta_{I,Rad} + 273)^4] \quad [W] \quad (6.7)$$

Der konvektive Wärmeverlust ergibt sich aus dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten h_{Conv} [$\frac{W}{m^2K}$] und der Differenz zwischen Umgebungs- und Oberflächentemperatur. h_{Conv} ist von der relativen Luftgeschwindigkeit an der Oberfläche v_{Air} [$\frac{m}{sec}$] sowie den Temperaturverhältnissen abhängig. Für kleine v_{Air} -Werte (freie Konvektion $v_{Air} < 0.1 \frac{m}{sec}$) ist die Temperaturdifferenz entscheidend und es empfiehlt sich der Ansatz $h_{Conv} = 2.05 \cdot (\theta_{Clo} - \theta_{I,air})^{0.25}$ [$\frac{W}{m^2K}$]. Für größere Werte (erzwungene Konvektion) ist die Luftgeschwindigkeit maßgebend, wofür Fanger die Gleichung $h_{Conv} = 10.4 \cdot \sqrt{v}$ [$\frac{W}{m^2K}$] vorschlägt. In den Ansätzen nach Gagge sowie Azer/Hsu werden ähnliche Annahmen für den konvektiven Wärmeübergang getroffen. [Fanger, 1967], [Gagge u. a., 1978], [Azer u. Hsu, 1977]

$$Q_{Conv} = A_{Body} \cdot f_{Clo} \cdot h_{Conv} \cdot (\theta_{Clo} - \theta_{I,air}) \quad [W] \quad (6.8)$$

6.3.3. Statisches, stationäres PMV- Modell nach Fanger

Das Bewertungsmodell nach P. O. Fanger stellt den meist verbreiteten Ansatz unter den statischen Modellen²² dar. Es wurde unter anderem in die Europäische Normung aufgenommen (DIN EN ISO 7730 [2006]). Ein Grund für die Etablierung dieses Modells ist in der praktikablen Bewertung einer Kombination von Bekleidung, Aktivität und Raumklimabedingungen (Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur, Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit) zu sehen. Fangers Bewertungsmodell basiert auf der 1967 durch ihn aufgestellten Behaglichkeitsgleichung. [Fanger, 1967]

Diese wurde aus der physiologischen Wärmebilanzgleichung des Menschen abgeleitet und definiert eine thermische Belastung (Thermal Load L_{Body} [W]), welche sich aus der metabolischen Wärmeerzeugung (Q_{Met}) abzüglich der Verlustanteile durch Diffusion (Q_{Diff} [W]), durch Schwitzen (Q_{Sweat} [W]), durch trockene und feuchte Atmungsverluste ($Q_{Res,L}$ [W] und $Q_{Res,S}$ [W]), Wärmeleitung über Bekleidung (Q_{Cond} [W]), Strahlung (Q_{Rad} [W]) und Konvektion (Q_{Conv} [W]) ergibt. Eine Übersicht dieser Verlustanteile und des Fanger- Ansatzes enthält Abbildung 6.3.

Fanger geht in diesem Ansatz davon aus, dass unter behaglichen Raumklimazuständen eine ausgeglichene Wärmebilanz existiert und keine nennenswerte Wärmespeicherung im Körper stattfindet. Aus diesem Grund ist die Anwendung des Modells für unbehagliche sowie für stark schwankende Raumklimabedingungen sehr problematisch. Die Grundform der Wärmebilanzgleichung stellt sich in Fangers Ansatz wie folgt dar:

$$L_{Body} = Q_{Met} - (Q_{Diff} + Q_{Sweat} + Q_{Res,S} + Q_{Res,L} + Q_{Rad} + Q_{Conv}) \quad (6.9) \quad [W]$$

Die Bilanzgleichung nach Fanger kann auf sechs Eingangskennwerte reduziert werden. Diese sind die Umgebungsparameter θ_a [°C], der Wasserdampfpartialdruck der Raumluft P_a [Pa], die mittlere Strahlungstemperatur der Umgebung θ_{rad} [°C], die

²²Statisch bezeichnet in diesem Zusammenhang das Verhalten einer Person als Reaktion auf unbehagliche Klimabedingungen. Im Gegensatz zu den adaptiven Ansätzen werden in den statischen Ansätzen keine Aktivitäten wie z.B. Anpassung der Bekleidung vorausgesetzt, welche zur Verbesserung der Behaglichkeit beitragen. Die Personen verhalten sich passiv, d.h. statisch.

6.3. Nutzerbezogene Bewertungsmodelle

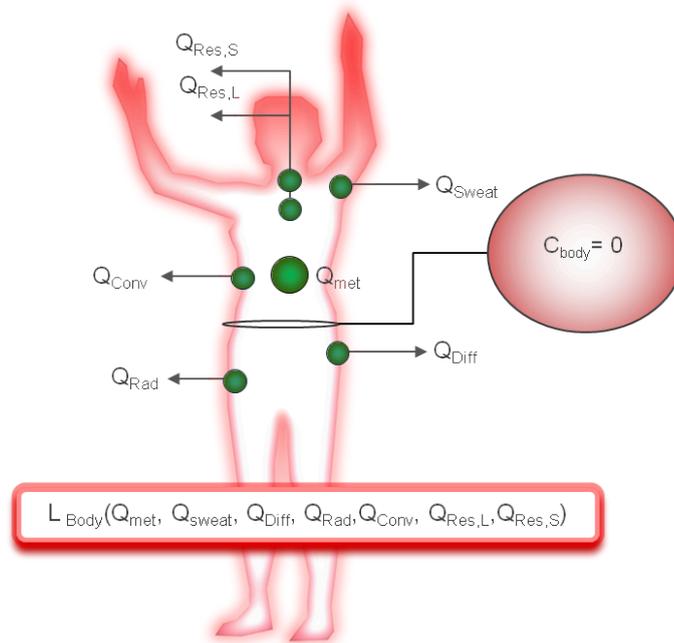


Abbildung 6.3.: Übersicht der Wärmebilanzanteile im Fanger- Modell. Das Ergebnis der Bilanz, L_{Body} , ergibt sich aus der Summe aller aufgeführten Wärmeverluste bzw. -gewinne. Es werden stationäre Verhältnisse angenommen. Daher bleibt die Speicherfähigkeit des Körpers, C_{body} , unbeachtet.

mittlere Raumluftgeschwindigkeit v [$\frac{m}{sec}$], die metabolische Wärmeerzeugung Q_H [W] sowie der Wärmedurchlasswiderstand der Bekleidung I_{clo} [$\frac{m^2K}{W}$].

Als Bewertungsindex verwendete Fanger eine, aus dem damaligen ASHRAE- Standard bekannte, Sieben- Punkte- Skala. Diese Skala beschreibt den neutralen Bereich mit dem Skalenmittelpunkt, welchem der Wert 0 entspricht. Abweichungen vom Optimum können im negativen Bereich (Auskühlung) und im positiven Bereich (Überhitzung) bis zu einem Betrag von 3 angegeben werden. Der akzeptable Bereich erstreckt sich darin vom Indexwert -1 (kühl) über 0 (Optimum) bis +1 (warm). Die ermittelten Indizes werden als PMV (Predicted Mean Vote), d.h. als mittlere zu erwartende Raumklimabewertungsindizes bezeichnet. Aus Klimakammerstudien, welche von Nevins und Mc. Nall in den 1960er Jahren durchgeführt wurden, bestimmte Fanger den Zusammenhang zwischen dem mittleren Votum der Versuchspersonen Y [-] (entspricht dem PMV) und der gegebenen thermischen Belastung L_{Body} [W]. Dabei korrigierte er den Verlauf für hohe Aktivitätsgrade, so

6. Nutzeranforderungen und Bewertungsmodelle

dass das Verhältnis $\frac{Y}{L_{Body}}$ mit steigendem Aktivitätsgrad gegen einen Minimalwert divergiert²³. Der ermittelte funktionelle Zusammenhang stellt sich wie folgt dar:

$$\begin{aligned} \frac{Y}{L_{Body}} &= 0.352 \cdot e^{-0.042 \cdot \frac{Q_{Met}}{A_{Body}}} + 0.032 & (6.10) \\ PMV &= L_{Body} \cdot 0.352 \cdot e^{-0.042 \cdot \frac{Q_{Met}}{A_{Body}}} + 0.032 & [o.E.] \end{aligned}$$

Zur Überführung des PMV-Index in ein praktisches Bewertungsmaß, schlägt Fanger die Berechnung des PPD- Index (Predicted Percentage of Dissatisfied) vor. Dieser gibt an, welcher Anteil einer größeren Nutzergruppe mit dem Klima unzufrieden sein wird, d.h. den Raumklimazustand mit einem PMV- Betrag über 0.5 bewerten würde. Der erreichbare PPD- Minimalwert liegt bei 5%. Der Index wird wie folgt ermittelt:

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{0.03353 \cdot PMV^4 - 0.2179 \cdot PMV^2} \quad [%] \quad (6.11)$$

Fanger weist darauf hin, dass die Anwendung des PMV- Modells Grenzen unterliegt²⁴ und dass bestimmte Einsatzbereiche des Modells weiteren Untersuchungen bedürfen.

Zur Feststellung der Übertragbarkeit auf andere Personengruppen führte Fanger Ende der 1960er Jahre ergänzende Studien mit dänischen Probanden durch. An Hand dieser Studien wies er nach, dass Faktoren wie Geschlecht, Alter, Konstitution, Gewicht und Nationalität für geringe Aktivitätsgrade keine signifikante Auswirkung auf die Behaglichkeitsempfindung haben²⁵. Fanger wies allerdings darauf hin, dass die Versuchsbedingungen²⁶ für alle Teilnehmer gleich waren. Subjektiv empfundene Unterschiede in den Behaglichkeitsanforderungen können daher beispielsweise auf Bekleidungsgehnheiten zurückgeführt werden.

²³Der Originalverlauf zeigte sich parabelförmig mit einem Minimalwert um ca. $90 \frac{kcal}{hm^2}$, [siehe dazu Fanger, 1970, Kap. 4, S. 113]

²⁴Fanger schloss die korrekte Anwendung des Modells für PMV- Indizes mit Beträgen über 2 aus.

²⁵Die Abweichungen beliefen sich für Personen höheren Gewichts gegenüber leichteren Personen auf ca. 0.2 K, für den Tageszeiteinfluss auf unter 0.5 K, für den Nationalitätseinfluss auf unter 0.2 K. Für die Betrachtung des Geschlechtseinflusses ergaben sich in den amerikanischen Studien höhere Vorzugstemperaturen für Frauen, in den dänischen Studien zeigte sich der umgekehrte Fall.

²⁶Alle Versuchspersonen trugen Testkleidung mit 0.6 clo und saßen während des Experiments. Tageszeit, Beleuchtungsstärke, Schallpegel, Luftwechsel und Versuchsablauf waren jeweils gleich.

6.3.4. Statisches, instationäres Modell nach Gagge & Stolwijk

Im Gegensatz zum Fanger- Modell setzt das in den 1970er Jahren veröffentlichte Modell von Gagge et. al. keine konstanten Randbedingungen voraus. Im Modell wird davon ausgegangen, dass die Differenz der physiologischen Wärmeströme einem Speicherreservoir zugeführt bzw. abgeführt werden kann. Folglich wären Kurzzeitabweichungen vom thermischen Optimum im Modell, wie auch in der Realität, tolerierbar.

Zur Abbildung des Speichereffektes wird der Körper in zwei Schichten aufgeteilt, die Kernschicht mit einem Körpermassenanteil von ca. 95 % und die Hüllschicht mit einem Massenanteil von ca. 5 %²⁷. Die Wärmebilanzanteile werden gemäß dieser Aufteilung jeweils einer Körperschicht zugewiesen. Darüber hinaus findet zwischen diesen beiden Körperpartien ein Wärmeaustausch statt. Die Differenz aus Wärmeverlusten und Wärmeeinträgen kann in der jeweiligen Schicht gespeichert werden und führt zu einer Erhöhung oder Reduktion der Kern- bzw. Hüllschichttemperatur. Eine Übersicht des Gagge- Ansatzes enthält die nachfolgende Abbildung 6.4.

Die Wärmebilanz der Körperhülle Q_{Skin} erhält die Verlustanteile aus Strahlung Q_{Rad} und Konvektion Q_{Conv} sowie Diffusion Q_{Diff} und Schweißabgabe Q_{Sweat} . Darüber hinaus finden Wärmeleitung $Q_{Ex,Cond}$ und Blutflusswärmeströmung $Q_{Ex,Blood}$ zur angrenzenden Kernschicht statt. Die Gleichungen zur Ermittlungen der Verlust- bzw. Gewinnanteile ($Q_{Sweat}, Q_{Diff}, Q_{Rad}$ etc.) unterscheiden sich in diesem Ansatz nur geringfügig von denen des Fanger- Ansatzes. [Gagge u. a., 1978] [Gagge u. a., 1971]

$$\begin{aligned}
 L_{Skin} &= Q_{Ex,Cond} + Q_{Ex,Blood} - Q_{Sweat} - Q_{Diff} - Q_{Rad} - Q_{Conv} \\
 &= K_{Cond} \cdot (\theta_{Core} - \theta_{Skin}) + c_{Blood} \cdot \dot{V}_{Blood} \cdot (\theta_{Core} - \theta_{Skin}) \\
 &\quad - Q_{Sweat} - Q_{Diff} - Q_{Rad} - Q_{Cond} \quad [W] \quad (6.12)
 \end{aligned}$$

Der Kern steht ebenso durch Wärmeleitung $Q_{Ex,cond}$ [W] und Blutflusswärmeströmung $Q_{Ex,Blood}$ [W] im Austausch mit der Hüllschicht. Über die latenten $Q_{Res,L}$ [W] und sensiblen $Q_{Res,S}$ [W] Atmungsverluste steht er im Austausch mit der Umgebungsluft. Zudem findet in der Kernschicht die Wärmefreisetzung aus den Stoff-

²⁷Diese Massenanteile verändern sich in diesem Modell in Abhängigkeit der Gefäßverengung bzw. Gefäßerweiterung. [Gagge u. a., 1978]

6. Nutzeranforderungen und Bewertungsmodelle

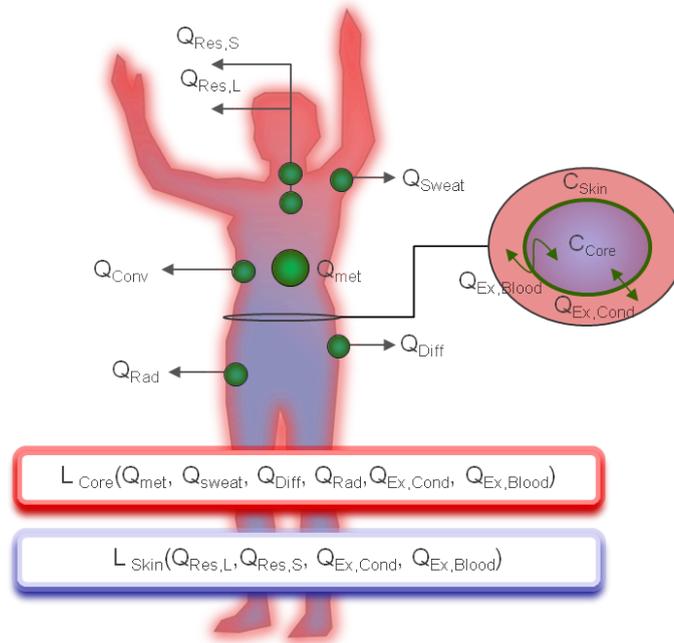


Abbildung 6.4.: Übersicht der Wärmebilanzanteile im Gagge- Modell. Die Ergebnisse der Hüllschicht- (L_{Skin}) und Körperkernbilanz (L_{Core}) ergeben sich aus der Bilanz aller aufgeführten Wärmeverluste bzw. -gewinne. Es werden instationäre Verhältnisse angenommen und daher die Speicherfähigkeiten der Hüll- und Kernschicht (C_{Skin} , C_{Core}) in der Bilanz über einen Austauschterm für die Wärmeleitung ($Q_{Ex,Cond}$) und einen Term für den Wärmeaustausch über Blutfluss ($Q_{Ex,Blood}$) berücksichtigt.

wechselforgängen Q_{Met} [W] statt:

$$\begin{aligned}
 L_{Core} &= -Q_{Ex,Cond} - Q_{Ex,Blood} + Q_{Met} - Q_{Res,S} - Q_{Res,L} \\
 &= -K_{Cond} \cdot (\theta_{Core} - \theta_{Skin}) - c_{Blood} \cdot \dot{V}_{Blood} \cdot (\theta_{Core} - \theta_{Skin}) \\
 &\quad + Q_{Met} - Q_{Res,S} - Q_{Res,L} \qquad \qquad \qquad [W] \qquad \qquad (6.13)
 \end{aligned}$$

Aus diesen Bilanzergebnissen ist über die spezifische Speicherkapazität, c_{Skin} bzw. c_{Core} [$\frac{Wh}{kgK}$], und die Masse der jeweiligen Schicht, m_{Skin} bzw. m_{Core} [kg] die Tem-

peraturveränderung in Kern- bzw. Hüllschicht ermittelbar.

$$\begin{aligned} \frac{\delta\theta_{Skin}}{\delta t} &= \frac{\delta L_{Skin}}{c_{skin} \cdot m_{skin}} && \left[\frac{K}{h} \right] \\ \frac{\delta\theta_{Core}}{\delta t} &= \frac{\delta L_{Core}}{c_{core} \cdot m_{core}} && \left[\frac{K}{h} \right] \end{aligned} \quad (6.14)$$

Im Ansatz nach Gagge wird das Bewertungsmaß für das Raumklima nicht aus den ermittelten physiologischen Kennwerten berechnet. Hingegen wird über einen zweiten Berechnungsschritt iterativ eine fiktive Umgebungstemperatur ermittelt. Diese setzt Gagge in die von Fanger aufgestellte Behaglichkeitsgleichung an Stelle der realen operativen Temperatur ein²⁸. Als Temperaturwert dieses Ansatzes kann entweder die Effektiv- (θ_{ET}) oder die Standardeffektivtemperatur (θ_{SET}) zur Anwendung kommen. [A. P. Gagge, 1986]

Unter der Effektivtemperatur ist die fiktive Operativtemperatur einer isothermen Umgebung mit 50% relativer Luftfeuchte gemeint. Unter dieser Operativtemperatur stellen sich rechnerisch die gleichen Verluste der äußeren Körperschicht ein wie in der realen Umgebung. Die Effektivtemperatur erhöht damit den Einfluss der Luftfeuchtigkeit²⁹. [A. P. Gagge, 1986]

$$PMV_{ET} = L_{Body}(\theta_{ET}) \cdot 0.352 \cdot e^{-0.042 \cdot \frac{Q_{Met}}{A_{Body}}} + 0.032 \quad [o.E.] \quad (6.15)$$

Die Standardeffektivtemperatur ergänzt den Effektivtemperaturansatz mit einem standardisierten Isoliergrad der Bekleidung. Der betreffende Wärmedurchlasswiderstand steigt mit zunehmender Aktivität und führt folglich zu einer stärkeren Wichtung der Aktivität³⁰. [A. P. Gagge, 1986]

$$PMV_{SET} = L_{Body}(\theta_{SET}) \cdot 0.352 \cdot e^{-0.042 \cdot \frac{Q_{Met}}{A_{Body}}} + 0.032 \quad [o.E.] \quad (6.16)$$

²⁸Dieser Ansatz führt zu einer Reduktion der PMV- Beträge bei schwankenden Umgebungsbedingungen, da die in der Gleichung angesetzte Bilanz auch die thermische Speicherfähigkeit des Körpers beinhaltet.

²⁹Für Umgebungen mit niedrigen Luftfeuchten sind im Vergleich zur Rechnung mit der originalen Operativtemperatur niedrigere Indexwerte (kühler) und für jene mit höheren Luftfeuchten erhöhte Indexwerte (wärmer) zu erwarten.

³⁰Es sind aus diesem Ansatz höhere Bewertungsmaße bei höherer Aktivität im Vergleich zum ET-Modell zu erwarten.

6.3.5. Statisches, instationäres TSV - Modell nach Azer & Hsu

Der Ansatz von Azer & Hsu greift ebenfalls das Zweiknotenmodell von Gagge zur Modellierung des körperlichen Wärmehaushalts auf. Die Autoren stellten fest, dass das Wärmeempfinden der Personen im warmen Temperaturbereich stark mit der Schweißsekretionsrate und im kühlen Temperaturbereich stark mit der Hauttemperatur korreliert. Dementsprechend wird das Maß zur Beurteilung der Behaglichkeit in diesem Modell aus den Schwellentemperaturen des Körperkerns bzw. der Hautoberfläche für die Schweißbildung, die Gefäßverengung- bzw. Gefäßweiterung sowie das Muskelzittern abgeleitet. [Azer u. Hsu, 1977]

Die Wärmebilanz entspricht im Wesentlichen dem von Gagge aufgestellten Ansatz. Im Gegensatz dazu werden allerdings die Wärmeaustauschprozesse, Wärmeleitung und Blutflusszirkulation, zwischen den beiden Körperkompartimenten in einem Term zusammengefasst. Der Übertragungskennwert ist der Wärmeübertragungskoeffizient KS . Eine Übersicht der Bilanz enthält Abbildung 6.5.

Die Bilanzgleichungen für die Haut- und die Kernschicht stellen sich folgendermaßen dar. [Azer u. Hsu, 1977]

$$\begin{aligned}
 L_{Skin} &= Q_{Ex} - Q_{Sweat} - Q_{Diff} - Q_{Rad} - Q_{Conv} \\
 &= KS \cdot (\theta_{Core} - \theta_{Skin}) \\
 &\quad - Q_{Sweat} - Q_{Diff} - Q_{Rad} - Q_{Conv} \quad [W] \quad (6.17)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 L_{core} &= -Q_{Ex} + Q_{Met} - Q_{Res,S} - Q_{Res,L} \\
 &= -KS \cdot (\theta_{Core} - \theta_{Skin}) \\
 &\quad + Q_{Met} - Q_{Res,S} - Q_{Res,L} \quad [W] \quad (6.18)
 \end{aligned}$$

Der enthaltene Wärmeübertragungskoeffizient $KS \left[\frac{W}{K} \right]$ wird von den Temperatursignalen aus der Kern- und Hautschicht bestimmt. Auf dessen Grundlage wird der Gefäßverengungsfaktor ϵ_{Vasoc} ermittelt. Aus diesem Wert empfehlen die Autoren die

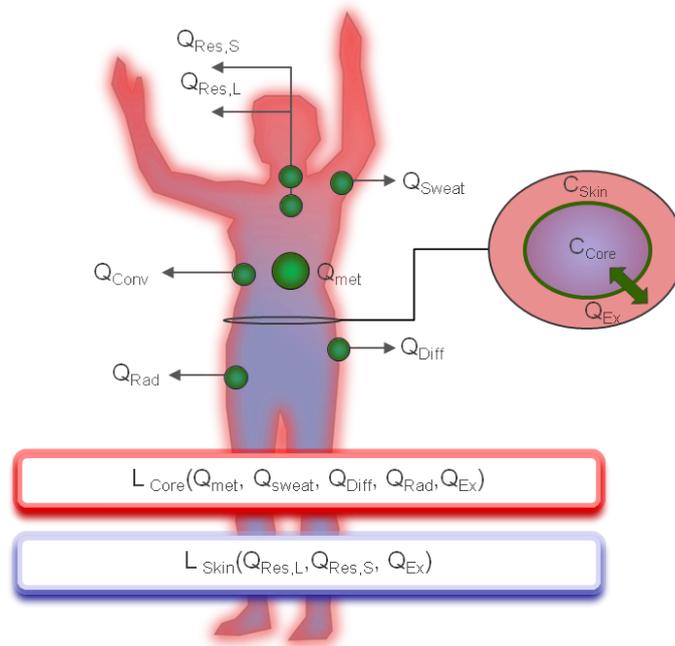


Abbildung 6.5.: Übersicht der Wärmebilanzanteile im Azer/Hsu- Modell. Die Ergebnisse der Hüllschicht- (L_{Skin}) und Körperkernbilanz (L_{Core}) ergeben sich aus der Bilanz aller aufgeführten Wärmeverluste bzw. -gewinne. Es werden instationäre Verhältnisse angenommen und daher die Speicherfähigkeiten der Hüll- und Kernschicht (C_{Skin} , C_{Core}) in der Bilanz über einen Austauschterm (Q_{Ex}) berücksichtigt.

Ableitung eines Behaglichkeitsindex für den kühlen Temperaturbereich TSV_{cold} ³¹.

$$TSV_{cold} = -1.46 \cdot \epsilon_{V_{asoc}} + 3.75 \cdot \epsilon_{V_{asoc}}^2 - 6.19 \cdot \epsilon_{V_{asoc}}^3 \quad [o.E.] \quad (6.19)$$

In ähnlicher Weise wird die Wärmeemission durch Schweißbildung Q_{Sweat} [W] aus den Kern- und Hauttemperatursignalen bestimmt und daraus der Schweißbenetzungsfaktor der Haut ϵ_{Sweat} [–] ermittelt. Dieser ist im Azer & Hsu- Modell neben der relativen Luftfeuchte $\phi_{I,air}$ [%] maßgebend für die Temperaturempfindung im warmen Bereich.

$$TSV_{warm} = (5.0 - 6.56 \cdot (\phi_a - 50.0)) \cdot \epsilon_{Sweat} \quad [o.E.] \quad (6.20)$$

³¹TSV = Thermal Sensation Value, Thermischer Empfindungswert

6. Nutzeranforderungen und Bewertungsmodelle

Die TSV- Bewertungsmaße liegen auf einer Skala mit neun Bewertungseinheiten zwischen -4 (unerträglich kalt) über 0 (Optimum) bis +4 (unerträglich heiß). Der Skalenbereich -3 bis +3 ist mit dem Fanger- und dem Gaggemodell identisch. [Azer u. Hsu, 1977]

6.3.6. Adaptive Modelle

Die adaptiven Behaglichkeitsmodelle setzen eine adaptive, d.h. angepasste Reaktion (Verhalten, Psyche u.a.) des Menschen bei unbehaglichen Raumklimazuständen voraus. Sie basieren vorrangig auf praktischen Studien in unklimateisierten Gebäuden. In diesen Studien wurde festgestellt, dass sich die Aussagefähigkeit der statischen Modelle mit zunehmender Abweichung vom optimalen Raumklimazustand verschlechtert. Diese Untersuchungen führten zur Annahme, dass es neben den physischen Einflussfaktoren auch nicht- physische Einflüsse auf die Raumklimaempfindung gibt.

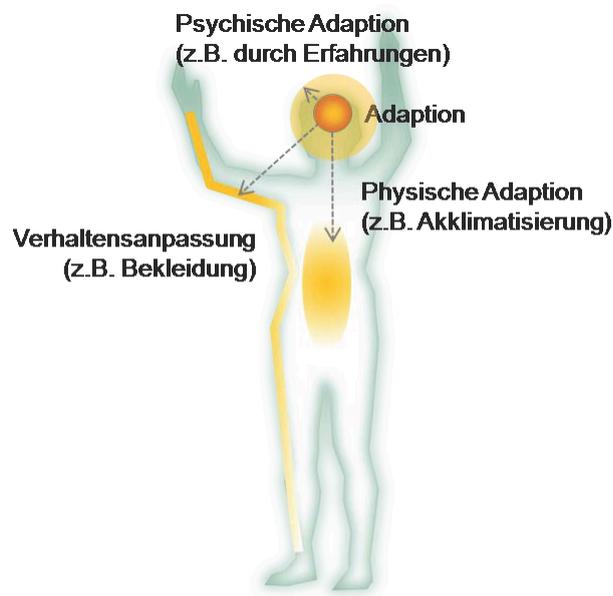


Abbildung 6.6.: Übersicht der berücksichtigten Faktoren in den adaptiven Modellen. Für die körperliche Wärmebilanz werden in dem Maße ausgeglichene Verhältnisse angenommen wie der Person Adaptionmöglichkeiten ermöglicht werden.

Als adaptives Verhalten im Sinne der nachfolgenden Nachweisverfahren sind insbesondere Verhaltensanpassung³², physiologische Anpassung³³ und psychologische

³²Das umfasst beispielsweise die Anpassung der Bekleidung, der Aktivität, der Position im Raum sowie Verbesserungsmaßnahmen für das Raumklima wie Erhöhung des Luftwechsels, Einsetzen der Verschattungsvorrichtungen u.a. [deDear u. a., 1997, S. 5]

³³Akklimatisierung und genetische Anpassung sind physiologische Anpassungen. [deDear u. a., 1997, S. 5]

6. Nutzeranforderungen und Bewertungsmodelle

Anpassung³⁴ gemeint. Ziel dieser Verfahren ist neben der Bereitstellung eines einfachen Auslegungskriteriums für das Raumklima auch die Begrenzung des Energieverbrauchs zur Beheizung oder Kühlung der zu bemessenen Gebäude. [deDear u. a., 1997], [Nicol u. Humphreys, 2002], [McCartney u. Nicol, 2002]

Adaptives Modell nach de Dear & Brager

De Dear und Brager entwickelten ihren Ansatz auf der Grundlage einer durch die ASHRAE erarbeiteten Datenbank, welche die Ergebnisse von Behaglichkeitsmessungen und -befragungen in ca. 160 Bürogebäuden verschiedener Länder enthält³⁵. Die Autoren weisen ausdrücklich darauf hin, dass dieses adaptive Verfahren nur unter bestimmten Voraussetzungen anwendbar ist. Diese Bedingungen sind eine freie, nutzerbestimmte Klimatisierung der Räume³⁶ und zudem Bekleidungsgeohnheiten sowie Aktivitätsgrade der Nutzer, welche denen einer Büronutzung ähnlich sind³⁷. Als Bezugswert für das Außenklima verwenden die Autoren das Monatsmittel der Außenlufttemperatur³⁸ $\theta_{month,av}$. Der ermittelte Zusammenhang zwischen der optimalen Raumlufttemperatur θ_{opt} und der Monatsmitteltemperatur ist nachfolgend aufgeführt. Er wurde auf einen Wertebereich von $10^{\circ}C < \theta_{month,av} < 33^{\circ}C$ begrenzt. [deDear u. a., 1997] [deDear u. Brager, 2001]

$$\theta_{opt} = 17.8 + 0.31 \cdot \theta_{month,av} \quad [^{\circ}C] \quad (6.21)$$

Adaptives Modell nach Nicol & Humphreys

Die Autoren Nicol und Humphreys stützen ihren Ansatz auf Untersuchungen in mehreren Bürogebäuden in Pakistan. Für diese frei- klimatisierten Gebäude wur-

³⁴Diese Form der Anpassung ist von den klimatischen Erfahrungen und damit zusammenhängenden Erwartungen bestimmt. [deDear u. a., 1997, S. 5-6]

³⁵Die 'American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers' veröffentlichte diese Studie als Projektbericht PR 884 der Autoren R. de Dear, G. Brager und D. Cooper im März 1997 unter dem Titel „Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference“.

³⁶Hauptvoraussetzung sind dabei die freie Fensterlüftung, keine Kühl- oder Heizlasten ([deDear u. a., 1997, S. 556, Abschnitt 4.1])

³⁷Es muss den Personen die Möglichkeit zur Anpassung ihrer Bekleidung gegeben sein. Ihre Aktivität sollte zwischen 1.0 und 1.3 *met* liegen. ([deDear u. a., 1997, S. 556, Abschnitt 4.1])

³⁸Damit ist nicht der Mittelwert aller erfassten Außenlufttemperaturwerte sondern das arithmetische Mittel aus dem durchschnittlichen Tagesminimums und Tagesmaximums des jeweiligen Monats gemeint. ([deDear u. a., 1997, S. 557, Abschnitt 4.2])

de ein nahezu lineares Verhältnis zwischen der Monatsmitteltemperatur und der gewünschten Raumlufthtemperatur herausgestellt ([Nicol u. Humphreys, 2002, Abb. 4, S. 566]). Als Hauptfaktoren des adaptiven Nutzerverhaltens benennen die Autoren die temperaturabhängigen Bekleidungsgeohnheiten, Aktivitätsgrade, Positionierungen sowie eine anpassbare relative Luftgeschwindigkeit³⁹. Der herausgestellte Zusammenhang zwischen dem Außenlufttemperaturkennwert θ_{wRM} ⁴⁰ und der optimalen Raumlufthtemperatur θ_{opt} lautete in der ersten Fassung ([Humphreys u. Nicol, 1995]) wie folgt.

$$\theta_{opt} = 12.9 + 0.534 \cdot \theta_{wRM} \quad [^{\circ}C] \quad (6.22)$$

Da die Bestimmung des gleitenden Mittelwertes und insbesondere des Wichtungsfaktors umständlich ist, wurde in der vereinfachten Form der Monatsmittelwert der Außenlufttemperatur $\theta_{month,av}$ gewählt. Zudem wurde der neue Ansatz in Anlehnung an die Arbeit von de Dear und Brager mit der umfassenden ASHRAE- Datenbank abgeglichen.

$$\theta_{opt} = 13.5 + 0.54 \cdot \theta_{month,av} \quad [^{\circ}C] \quad (6.23)$$

Adaptives Modell nach McCartney & Nicol

Der Ansatz von McCartney und Nicol basiert auf dem Forschungsprojekt SCATs⁴¹. Die darin untersuchten Gebäude sind vorrangig Bürogebäude bzw. Gebäude mit einer büroähnlichen Nutzung. Als Kennwert der Außenlufttemperatur verwenden die Autoren ebenfalls den gleitenden Mittelwert der Außenlufttemperatur θ_{wRM}

³⁹In den untersuchten Gebäuden standen flächendeckend Ventilatoren zur Verfügung. [Nicol u. Humphreys, 2002, S. 565]

⁴⁰Damit ist der gewichtete gleitende Mittelwert (engl.: „weighted running mean temperature“) der Außenlufttemperatur gemeint. Er wird im vorliegenden Modell aus den mittleren Temperaturen der vorherigen Tage $\theta_{n-1}, \theta_{n-2}, \theta_{n-3}$ und θ_{n-4} sowie einem Wichtungsfaktor α berechnet. Je höher der Wichtungsfaktor ist, desto größer ist der Einfluss der zurückliegenden Werte. Die Autoren verwendeten den Wert $\alpha = 0.8$ ([Nicol u. Humphreys, 2002, S.568]). Die Gleichung lautet $\theta_{wRM} = (1 - \alpha) \cdot (\theta_{n-1} + \alpha^1 \cdot \theta_{n-2} + \alpha^2 \cdot \theta_{n-3} + \dots$ ([Nicol u. Humphreys, 2002, S.568])

⁴¹Dieses Projekt wurde im Zeitraum 1997 bis 2000 durch mehrere europäische Universitäten bearbeitet. Es umfasste unter anderem die Durchführung von Behaglichkeitsmessungen und Befragungen in fünf europäischen Ländern und die Ableitung der Komfortgleichung aus diesen Erhebungen.([McCartney u. Nicol, 2002, S. 624-626])

6. Nutzeranforderungen und Bewertungsmodelle

[°C]⁴². Den aus der Studie herausgestellten Zusammenhang enthält nachfolgende Gleichung.

$$\theta_{opt} = 19.39 + 0.302 \cdot \theta_{wRM} \quad [^{\circ}C] \quad (6.24)$$

Die Anwendung dieser Gleichung wird für Optimaltemperaturen oberhalb von 22.9°C und ausschließlich für gemäßigte Klimazonen empfohlen. [McCartney u. Nicol, 2002]

Anwendung adaptiver Modelle für Krankenhausbauten

Die vorgestellten Ansätze für adaptive Behaglichkeitsmodelle weisen jeweils zwei Eigenschaften auf, welche eine Anwendung für Krankenhäuser ausschließen bzw. stark einschränken. Erstens basieren diese Modelle auf Messungen und Befragungen in Bürogebäuden. Die Eigenschaften der dortigen Nutzer, insbesondere der tätigkeitsbezogene Leistungsumsatz und die Bekleidungsgehnheiten, unterscheiden sich erheblich von denen der Krankenhausnutzer (Patienten, Personal). Zweitens kann für Patienten in einem Krankenhaus nicht angenommen werden, dass sie über vergleichbare physische oder psychische Anpassungsmöglichkeiten verfügen. So sind beispielsweise die Aufenthaltsorte im Raum, die Bekleidungsanpassung, die Steuerungsmöglichkeiten für Fensterlüftung, Sonnenschutz, Ventilator etc. und die Aktivitätsanpassung deutlich eingeschränkt. Aus diesen Gründen muss eine Anwendung der erläuterten adaptiven Behaglichkeitsmodelle für Krankenhausbauten ausgeschlossen werden.

⁴²Die Berechnung unterscheidet sich von dem durch Humphreys aufgestellten Ansatz. Es wird folgender Ansatz vertreten: $\theta_{wRM} = (1 - \alpha) \cdot \theta_{n-1} + \alpha \cdot \theta_{wRM,n-1}$. Darin ist $\theta_{wRM,n-1}$ der gleitende Mittelwert der Außenluft am vorhergehenden Tag. Für α wird ebenfalls der Wert 0.8 empfohlen. ([McCartney u. Nicol, 2002, S.628])

6.3.7. Bewertung der Behaglichkeitsmodelle

Im Folgenden sollen die vorgestellten vier statischen Methoden zur Bewertung der Behaglichkeit verglichen werden. Dieser Vergleich soll für die variierenden Patienten- bzw. Nutzereigenschaften vorgenommen werden. Da die adaptiven Modelle keine Berücksichtigung von Nutzerbesonderheiten erlauben, bleiben diese Modelle im Vergleich unbeachtet. Für den Modellvergleich wurde eine C++-Klassenbibliothek erstellt⁴³.

Abbildungen 6.7 und 6.8 enthalten die klimatischen Randbedingungen und die Modellergebnisse für einen beispielhaften Jahresraumklimaverlauf mit Schwankungen der Raumlufttemperatur im Bereich von 21–36°C sowie der Raumluftfeuchte im Bereich von 15–60 % für eine moderat bekleidete ($I_{clo} = 0.124 \frac{W}{m^2K}$ bzw. $I_{clo} = 0.8 clo$) und mäßig aktive ($M = 81.2 \frac{W}{m^2}$ bzw. $M = 1.4 met$) Person.

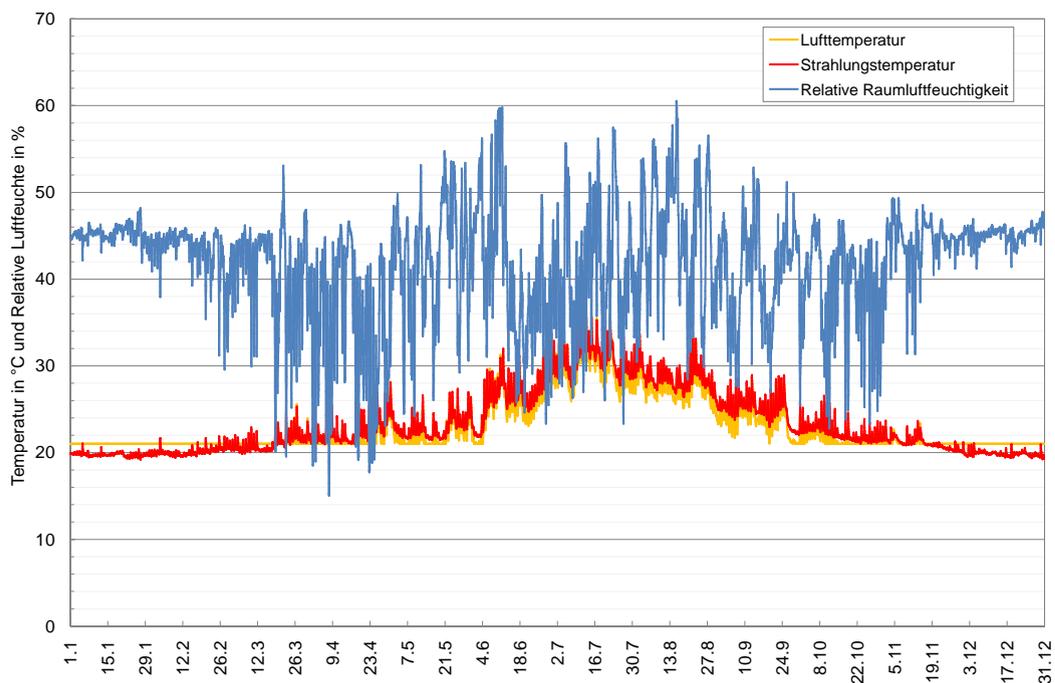


Abbildung 6.7.: Übersicht des beispielhaften Raumklimaverlaufs. Als mittlere relative Luftgeschwindigkeit wurde ein Wert von $1.0 \frac{m}{sec}$ angenommen.

⁴³Eine Übersicht der erstellten Klassen (Klassendiagramm) befindet sich im Anhang auf Seite XXXV. Hierfür wurde neben den im vorherigen Kapitel erwähnten Literaturquellen auch [Lee u. a., 2000] hinzugezogen.

6. Nutzeranforderungen und Bewertungsmodelle

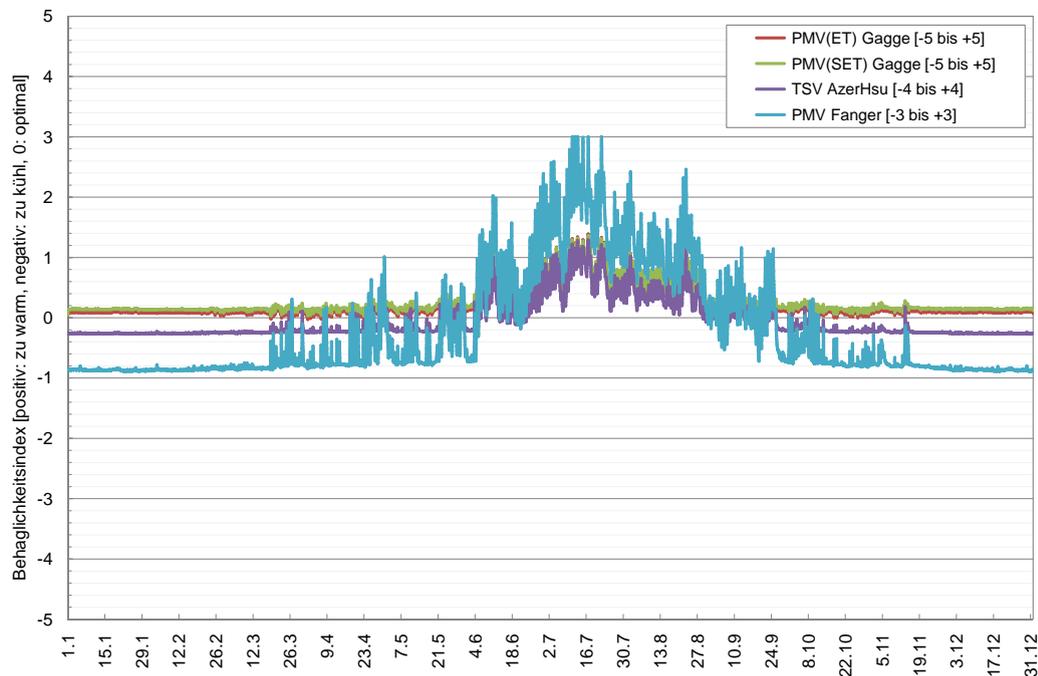


Abbildung 6.8.: Übersicht der resultierenden Behaglichkeitsindizes für den beispielhaften Jahresraumklimaverlauf

Die Gegenüberstellung offenbart die Reaktionsgeschwindigkeit der Modelle auf Schwankungen des Raumklimas und die vom Modell vorhergesagten Optimaltemperaturen. Erwartungsgemäß sind die Schwankungen des Fanger- Modells sehr groß, da in diesem Ansatz die Speicherkapazität des Körpers unbeachtet bleibt und die Thermoregulationsmechanismen des Körpers (Gefäßmotorik u.a.) nicht abgebildet werden. Die Verläufe der übrigen Modelle stellen sich ähnlich dar. Zur Überführung der berechneten Indexwerte in Richtwerte für die optimale operative Raumtemperatur können die Temperaturwerte gemittelt werden, für welche zeitgleich ein optimaler Indexwert von -0.5 bis $+0.5$ erreicht wird. Die optimalen Temperaturen belaufen sich nach diesem Ansatz auf ca. 24.3°C (PMV Fanger), 22.2°C (PMV ET Gagge), 22.1°C (PMV SET Gagge) sowie 22.6°C (TSV Azer/ Hsu).

Der von den praktischen Studien näherungsweise angegebene optimale Temperaturbereich von ca. $22 - 26^{\circ}\text{C}$ (siehe hierzu S. 145) wird folglich durch alle Modelle vorhergesagt. Dabei präferiert das stationäre Fanger- Modell deutlich höhere Vorzugstemperaturen als die übrigen Modelle. Es wurde in diesem Beispiel angenommen, dass die Person leicht bekleidet und gesund ist.

Im Folgenden sollen die Modelle auf Patienten angewandt werden. Diese unterscheiden sich durch die in Abschnitt 6 aufgeführten Besonderheiten. Zur Abbildung dieser Eigenschaften werden die Behaglichkeitsmodelle mit den in Tabelle 6.2 und 6.4 aufgeführten Kennwerten angepasst. Das ermöglicht die Berücksichtigung des vorhandenen anliegenden und isolierenden Bettsystems sowie der körperlichen Besonderheiten von Patienten wie z.B. verminderter Grundumsatz und veränderte Schweißabgaberraten.

Einfluss des Bettsystems auf das optimale Raumklima

Da sich die Patienten überwiegend in einem Krankenbett befinden, muss in der Bemessung der optimalen Temperaturbedingungen auch das Bettsystem Beachtung finden. Zu diesem Zweck wurden die in Tabelle 6.2 auf Seite 134 erstellten Bekleidungs-/Bettkombinationen mit den Modellen berechnet. Der Vergleich erfolgte für den im vorherigen Abschnitt dargestellten Raumklimaverlauf. Da liegende Personen keinen erheblichen Leistungsumsatz aufweisen, wurde für die metabolische Aktivität lediglich der Grundumsatz ($M = 58.0 \frac{W}{m^2}$) veranschlagt.

Tabelle 6.6.: Optimaltemperaturen aus den statischen Modellen für den beispielhaften Raumklimaverlauf und unterschiedliche Isolierkennwerte des Bettsystems. Es wurde $Q_{Met} = 58.0 \frac{W}{m^2}$ (1.0 met) angenommen.

Bettsystem	I_{cl} [clo]	$\theta_{opt,Fanger}$	$\theta_{opt,Gagge,ET}$	$\theta_{opt,Gagge,SET}$	$\theta_{opt,AzerHsu}$
A)	1.56	21.4°C	21.7°C	–	21.9°C
B)	2.11	20.9°C	21.1°C	–	21.3°C
C)	1.21	24.5°C	22.1°C	21.9°C	22.4°C
D)	2.02	21.0°C	21.2°C	–	21.4°C

Der Isolationsgrad beeinflusst in den vorgestellten Modellen die Wärmeverluste über Strahlungsaustausch und Konvektion. Je stärker das Bettsystem isoliert, desto geringer ist die mögliche Wärmeabgabe der äußeren Körperschichten und desto geringer ist folglich die Toleranz gegenüber hohen Temperaturen.

Aus der Gegenüberstellung ist zu erkennen, dass die optimalen Temperaturen in einem Patientenaufenthaltsraum je nach Bettsystem um 3.6°C (PMV), 1.0°C (PM-VET) bzw. 1.1°C (TSV) variieren. Das Gagge- SET- Modell reagiert sehr empfind-

6. Nutzeranforderungen und Bewertungsmodelle

lich auf die hohen Isolationsgrade und gibt für sämtliche Fälle unbehaglich warme Bewertungsmaße aus. Die optimale operative Raumtemperatur läge demzufolge unterhalb der im Verlauf angenommenen Minimaltemperatur (Solltemperatur Heizung) von 21°C .

In der Praxis ist damit zu rechnen, dass der zusätzliche Isolationsgrad des Bettsystems durch den reduzierten Grundumsatz der körperlich schwachen und liegenden Personen zum Teil kompensiert wird. Zum Vergleich dieses Einflusses werden nachfolgend die in Tabelle 6.4 (S. 142) angegebenen metabolischen Aktivitäten verglichen.

Einfluss der metabolischen Wärmeerzeugung

Aus Tabelle 6.4 ist ersichtlich, dass mit zunehmendem Alter eine reduzierte metabolische Wärmeproduktion einhergeht. Diese Wärmeproduktion geht einerseits direkt in die physiologischen Bilanzgleichungen und andererseits indirekt über die empirischen Zusammenhänge in den einzelnen Verlustanteilsleichungen für z.B. sensible und latente Atmungsverluste⁴⁴, Verluste über Transpiration⁴⁵ sowie konvektive Verluste⁴⁶ ein. Folglich verursacht eine Reduktion des Grundumsatzes einerseits geringere Wärmeeinträge im Körperinneren und andererseits geringere Verluste über Atmung, Schwitzen und Konvektion.

Die nachfolgende Gegenüberstellung enthält einen Vergleich unterschiedlicher Grundumsätze. Es wurde für diese Beispielrechnung zu Vergleichszwecken angenommen, dass der gesamte Leistungsumsatz der Personen dem 1.4-fachen dieses Grundumsatzes⁴⁷ entspricht und dass die Bekleidung den Isolationsgrad von Bettsystem A, d.h. $I_{clo} = 0.25 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ (1.56 clo) aufweist.

Je nach Altersstufe und Grundumsatz der Personen ergeben sich für den gewählten Leistungsumsatz Variationen des Optimalbereichs von 3.3°C (PMV), 0.7°C (PM-

⁴⁴Der Lungenförderstrom wird in allen Modellen in Abhängigkeit der metabolischen Wärmeproduktion angegeben.

⁴⁵Diese Abhängigkeit ist ausschließlich im Fanger- Modell enthalten.

⁴⁶Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient steigt mit zunehmender Aktivität, da die an der Körperoberfläche vorherrschende relative Luftgeschwindigkeit zunimmt.

⁴⁷In den originalen Gleichungen wird ein Grundumsatz von ca. $58 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ aufgeführt. Die in Tabelle 6.4 enthaltenen Werte liegen selbst für eine erwachsene Person unterhalb dieses Wertes. Damit eine Vergleichbarkeit gewährleistet ist, wurde der Grundumsatz für die Altersgruppe 20 als Bezugswert einer gesunden erwachsenen Person angenommen. Damit der Leistungsumsatz dieser Person dem Normwert von $58 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ entspricht, beträgt der Korrekturfaktor $\frac{58}{41} = 1.415$.

Tabelle 6.7.: Optimaltemperaturen aus den statischen Modellen für den beispielhaften Raumklimaverlauf für unterschiedliche Grundumsätze. Es wurde $I_{clo} = 0.25 \frac{W}{m^2K}$ angenommen.

Altersgruppe	Q_{met} [$\frac{W}{m^2}$]	$\theta_{opt,Fanger}$	$\theta_{opt,Gagge,ET}$	$\theta_{opt,Gagge,SET}$	$\theta_{opt,AzerHsu}$
K 10-13	69.3	21.1°C	21.4°C	–	21.6°C
K 14-16	67.9	21.2°C	21.4°C	–	21.6°C
E 20-29	58.0	21.4°C	21.7°C	–	21.9°C
Ä 46-67	50.9	24.4°C	22.1°C	21.4°C	22.7°C

VET) sowie 1.1°C (TSV). Die Ausgabekennwerte des Gagge- SET- Modells variieren um einen Skalenwert von über 0.5 und steigen ebenso wie bei den anderen Modellen mit dem Alter. Da in diesem Modell keine optimalen Bedingungen erreicht werden, kann lediglich festgestellt werden dass das Optimum hier unterhalb von 21°C liegt.

Grundsätzlich ist der Einfluss der variierenden Grundumsätze plausibel. Je nach Altersgruppe ergeben sich in den instationären Modellen Unterschiede von etwa 1°C.

Einfluss der Kern - und Hauttemperatur

Eine weitere Veränderung, die mit dem fortschreitenden Alter einhergeht, ist die Reduktion der Neutraltemperaturen des Körpers. Richtwerte für diesen Effekt sind ebenfalls beispielhaft für unterschiedliche Altersgruppen in Tabelle 6.4 auf Seite 142 aufgeführt. Beide Temperaturwerte bedingen alle Bilanzanteile⁴⁸. Eine Erhöhung der Haut- und Kerntemperatur ist für die vorgestellten Modelle nur eingeschränkt umsetzbar. Beispielsweise werden die Wärmeübertragung zwischen den Körperschichten, die Schweißbildung und das Zittern mit Hilfe von Grenztemperaturen ermittelt, deren Abhängigkeit von den Neutraltemperaturen nicht umfassend dokumentiert ist. Eine Veränderung der Neutraltemperaturen bedingt daher einerseits veränderte Grenzbedingungen für die Wärmeübertragung zwischen den Körperschichten, das Schwitzen und das Zittern und andererseits erhöhte Verlustbeträge.

⁴⁸Einschränkungen sind durch die jeweiligen Modellvereinfachungen gegeben. So ist im Azer- Hsu-Ansatz ebenso wie im Fanger- Ansatz keine Abhängigkeit der Schweißverluste von der Hauttemperatur modelliert.

6. Nutzeranforderungen und Bewertungsmodelle

Tabelle 6.8.: Optimaltemperaturen aus den statischen Modellen für den beispielhaften Raumklimaverlauf und unterschiedliche Neutraltemperaturen der Haut und des Körperkerns. Die übrigen Randbedingungen der Berechnung lauten $I_{clo} = 0.25 \frac{W}{m^2K}$ (1.56 clo) und $Q_{Met} = 58.0 \frac{W}{m^2}$ (1.0 met).

Altersgruppe	θ_{skin} θ_{core}	$\theta_{opt,Fanger}$	$\theta_{opt,Gagge,ET}$	$\theta_{opt,Gagge,SET}$	$\theta_{opt,AzerHsu}$
K 10-13	35.2°C 37.4°C	23.7°C	21.9°C	22.0°C	22.2°C
E 20-29	34.1°C 36.9°C	21.4°C	21.7°C	22.0°C	22.2°C
Ä 46-67	33.5°C 36.6°C	21.2°C	21.6°C	20.8°C	22.0°C

Aus der Gegenüberstellung ist eine identische Auswirkung der veränderten Temperaturen auf die Komfortempfindung zu entnehmen. Höhere Neutraltemperaturen der Haut und des Körperkerns erzeugen höhere Vorzugstemperaturen. Die Differenzen zwischen den optimalen Operativtemperaturen der gewählten Altersgruppen betragen 2.5°C (PMV), 0.3°C (PMV(ET)), 1.2°C (PMV(SET)) und 0.2°C (TSV).

Einfluss der potenziellen Schweißsekretionsrate

Mit fortschreitendem Alter ist ebenfalls eine Reduktion der Schweißsekretionsrate zu verzeichnen. Beispielhaft wurden in Tabelle 6.4 Werte für verschiedene Altersgruppen angegeben. Vom ersten bis zum siebzigsten Lebensjahr reduziert sich der Emissionswert um etwa zwei Drittel. Daraus ist ein leichter Anstieg der Toleranz gegenüber hohen Temperaturen zu erwarten, d.h. Jüngere müssten höhere Optimaltemperaturen bevorzugen als Ältere. Die berechneten Werte sind in Tabelle 6.9 enthalten.

Da im Fanger- Modell erst oberhalb von $M = 58 \frac{W}{m^2}$ Wärmeverluste durch Schwitzen angenommen werden, ändern sich die Vorzugstemperaturen für das gewählte Beispiel nicht. Für die übrigen Modelle stellt sich nicht der erwartete Zusammenhang dar. Die Vorzugstemperaturen sinken mit höherer potenzieller Schweißrate. Das ist darauf zurückzuführen, dass in diesen Modellen ständig Schweißverluste veranschlagt werden. Diese erhöhen folglich die Wärmeverluste und begünstigen damit

Tabelle 6.9.: Optimaltemperaturen aus den statischen Modellen für drei unterschiedliche Stufen der potenziellen Schweißsekretionsraten. SR ist die durchschnittliche Schweißsekretionsrate. Die übrigen Randbedingungen der Berechnung lauten: $I_{clo} = 0.25 \frac{W}{m^2K}$ (1.56 clo) und $Q_{Met} = 58 \frac{W}{m^2}$ (1.0 met).

Altersgruppe	$SR \frac{g}{m^2K}$	$\theta_{opt,Fanger}$	$\theta_{opt,Gagge,ET}$	$\theta_{opt,Gagge,SET}$	$\theta_{opt,TSV}$
K 1-4	113.4	21.4°C	21.6°C	–	21.8°C
E 20-29	88.8	21.4°C	21.7°C	–	21.9°C
Ä >70	21.4	21.4°C	21.9°C	22.0°C	22.6°C

bei niedrigen Umgebungstemperaturen das Auskühlen des Körpers. Daher werden kühle Raumklimabedingungen bei höheren Schweißsekretionsraten in den Modellen schlechter toleriert.

Gegenüberstellung von Nutzertypen

Die thermoregulatorischen Eigenschaften einer Person beeinflussen sich gegenseitig. Es soll daher nachfolgend festgestellt werden, ob sich hilfreiche Erkenntnisse aus der Betrachtung der Gesamtheit aller Faktoren ergeben. Zu diesem Zweck werden unterschiedliche Nutzertypen aufgestellt, welche beispielhaft für die möglichen Patienten- und Angestelltentypen in einem Krankenhaus stehen. Deren thermoregulatorische Eigenschaften sind in Tabelle 6.10 aufgeführt.

Es wurden für die Angaben in Tabelle 6.10 die Kennwerte aus Tabelle 6.4 für die physiologischen Eigenschaften sowie aus Tabelle 6.1 für die Bekleidungs-eigenschaften des Personals sowie 6.2 für die Eigenschaften der Bettsystem- Bekleidungs- Kombinationen angewandt. Für den Leistungsumsatz wurde der aus Tab. 6.4 entnommene Grundumsatz für die Patienten mit dem Faktor 1.41 normalisiert damit der Kennwert einer erwachsenen Person dem Normwert von $58 \frac{W}{m^2}$ entspricht. Für das Personal wurden, gemäß den Angaben der praktischen Studien in Abschnitt 6.2.6, Werte von 2.0 met (aktiv) und 2.5 met (sehr aktiv) sowie ein Bekleidungsgrad von 0.6 clo angenommen.

Eine separate Betrachtung des Oberflächen- Volumen- Verhältnisses wurde nicht

6. Nutzeranforderungen und Bewertungsmodelle

Tabelle 6.10.: Übersicht der aufgestellten Nutzertypen und deren thermoregulatorische Eigenschaften.

Typbezeichnung	$\theta_{n,core}$	$\theta_{n,skin}$	Q_{met}	I_{cl}	SR	w und h
0) Kind, liegend, teilbedeckt	$37.5^{\circ}C$	$35.0^{\circ}C$	$69.6 \frac{W}{m^2}$	1.56 <i>clo</i>	$113.4 \frac{g}{hm^2}$	45 <i>kg</i> , 145 <i>cm</i>
1) Kind, liegend, bedeckt	$37.5^{\circ}C$	$35.0^{\circ}C$	$69.6 \frac{W}{m^2}$	2.1 <i>clo</i>	$113.4 \frac{g}{hm^2}$	45 <i>kg</i> , 145 <i>cm</i>
2) Erwachsener, liegend, bedeckt	$37.0^{\circ}C$	$34.0^{\circ}C$	$58.0 \frac{W}{m^2}$	2.11 <i>clo</i>	$88.8 \frac{g}{hm^2}$	75 <i>kg</i> , 175 <i>cm</i>
3) Älterer liegend, teilbedeckt	$36.9^{\circ}C$	$33.5^{\circ}C$	$51.1 \frac{W}{m^2}$	1.56 <i>clo</i>	$34.2 \frac{g}{hm^2}$	75kg, 170cm
4) Älterer liegend, vollst. bedeckt	$36.9^{\circ}C$	$33.5^{\circ}C$	$51.1 \frac{W}{m^2}$	2.11 <i>clo</i>	$34.2 \frac{g}{hm^2}$	75 <i>kg</i> , 170 <i>cm</i>
5) Erwachsener aktiv, Arbeitskleidung	$37.0^{\circ}C$	$34.0^{\circ}C$	$116.0 \frac{W}{m^2}$	0.60 <i>clo</i>	$88.8 \frac{g}{hm^2}$	75 <i>kg</i> , 175 <i>cm</i>
6) Erwachsener sehr aktiv, Arbeitskleidung	$37.0^{\circ}C$	$34.0^{\circ}C$	$145.0 \frac{W}{m^2}$	0.60 <i>clo</i>	$88.8 \frac{g}{hm^2}$	75 <i>kg</i> , 175 <i>cm</i>

vorgenommen, da die Modellergebnisse dafür sehr geringe Veränderungen zeigen.⁴⁹

Die Ergebnisse der behaglichen Temperaturbereiche für diese Nutzertypen, d.h. der mittleren operativen Temperaturen aller Zeitwertbeträge der Indizes zwischen -0.5 und +0.5 enthält die nachfolgende Tabelle 6.11.

Es ist insbesondere von Interesse, welche Nutzertypen die geringsten bzw. höchsten Vorzugstemperaturen aufweisen und wie diese Kennwerte mit den praktischen Befragungen übereinstimmen.

Es zeigt sich, dass zur Festlegung der Maximaltemperaturen in allen Modellen die Anforderungen von Kindern maßgebend sind. Diese weisen die geringsten Vorzugstemperaturen von $21^{\circ}C$ auf. Die Rechnungen für erwachsene Personen (Patienten und Angestellte) ergaben einen Optimalwert von ca. $22 - 23^{\circ}C$.

⁴⁹Diese Differenzen belaufen sich auf weniger als 0.1 K PMV(ET), 0.3 K PMV(SET) sowie 0.1 K TSV zwischen einem Kleinkind mit $\frac{A}{V} = 50 \frac{m^2}{m^3}$ und einem Erwachsenen $\frac{A}{V} = 27 \frac{m^2}{m^3}$ für die im ersten Abschnitt benannten Bedingungen.

Tabelle 6.11.: Berechnete optimale Operativtemperaturen (Mittelwerte der Operativtemperaturen für Bewertungsindizes zwischen -0.5 und +0.5) der Krankenhaus- Nutzertypen.

Typbezeichnung	$\theta_{opt,Fanger}$	$\theta_{opt,Gagge,ET}$	$\theta_{opt,Gagge,SET}$	$\theta_{opt,Azer/Hsu}$
0) Kind liegend, teilbedeckt	21.43°C	21.58°C	–	21.78°C
1) Kind liegend, bedeckt	20.95°C	20.96°C	–	21.10°C
2) Erwachsener, liegend, bedeckt	20.92°C	21.16°C	–	21.58°C
3) Älterer liegend, teilbedeckt	23.69°C	22.45°C	21.56°C	22.79°C
4) Älterer liegend, bedeckt	21.15°C	21.83°C	–	22.09°C
5) Erwachsener aktiv, Arbeitskleidung	21.37°C	21.96°C	21.70°C	22.65°C
6) Erwachsener sehr aktiv, Arbeitskleidung	20.90°C	21.54°C	21.66°C	22.03°C

Es ist zu resümieren, dass das anliegende Bettsystem etwa um 1 – 2 K geringere Vorzugstemperaturen verursacht (Vgl. Typ 0 und 1 sowie 3 und 4) und dass die Solltemperatur für die Beheizung in Krankenhausräumen mit älteren Patienten etwa 23 – 24°C (Vgl. Typ 1 und 2) und in Räumen mit Kindern etwa 21 – 22°C betragen sollten.

Entscheidend für die Raumklimaauslegung ist neben der Optimaltemperatur auch der zulässige Abweichungsbereich. Zu diesem Zweck wurden in Abbildung 6.9 die Häufigkeiten der als behaglich empfundenen Temperaturkennwerte für das Modell Azer & Hsu angegeben. Daraus können Rückschlüsse auf den erträglichen Temperaturbereich bzw. auf die zulässigen Überschreitungshäufigkeiten gezogen werden.

Die Verteilung der behaglichen Temperaturkennwerte offenbart große Unterschiede zwischen den Nutzertypen. Die mit Abstand toleranteste Nutzergruppe ist das Personal. Ältere Personen weisen eine etwas geringere Toleranz gegenüber Temperaturabweichungen vom Optimum auf. Für Kinder stellt sich der weitaus geringste Toleranzbereich dar.

6. Nutzeranforderungen und Bewertungsmodelle

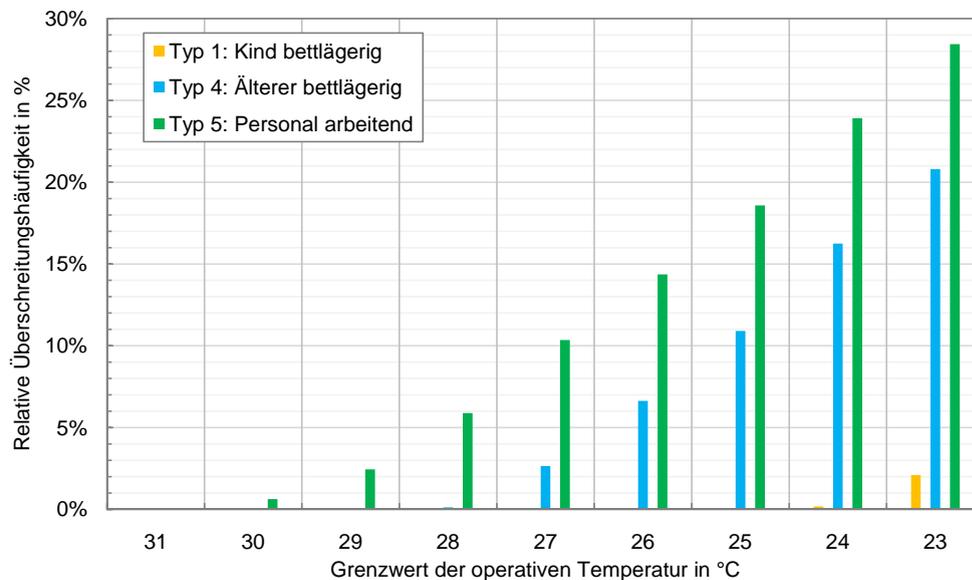


Abbildung 6.9.: Häufigkeit der als behaglich ermittelten Operativtemperaturen für drei ausgewählte Typen im Azer & Hsu- Modell. Es wurden jeweils die Stundenwerte der Operativtemperatur gemittelt, bei denen der Indexwert des Modells zwischen -0.5 und 0.5 lag.

Für kühle Umgebungsbedingungen zeigt sich eine geringe Toleranz, da den Kindern infolge höherer Neutraltemperaturen höhere Verlustbeträge anzurechnen sind und den älteren Personen geringere körperliche Wärmeerzeugung zum Ausgleich der Verluste zur Verfügung steht.

Im Falle warmer Umgebungsbedingungen sind Kinder ebenfalls auf Grund der höheren Neutraltemperaturen benachteiligt. Deren potenzielle Wärmeabgabe ist dann wegen der geringeren Temperaturdifferenz zwischen Hautoberfläche und Umgebung reduziert. Hinzu kommt die höhere metabolische Wärmeerzeugung der Kinder.

Das Personal ist im Gegensatz dazu gegenüber Abweichungen vom Optimum der Operativtemperatur deutlich weniger empfindlich. Es verfügt zudem über Anpassungsmöglichkeiten in physischer (Aktivitätsreduktion, Standortwechsel, Bekleidungsgeohnheiten, Pausen etc.) und psychischer (Entlastung außerhalb der Arbeitszeit) Hinsicht.

Es ist zu schlussfolgern, dass die Maximaltemperaturen für das Personal etwa 31°C , für Ältere 28°C sowie für Kinder 25°C nicht überschreiten sollten.

6.3. Nutzerbezogene Bewertungsmodelle

Für die Sommerfallbemessung wird oftmals eine maximale Überschreitungshäufigkeit als Grenzwert angegeben. Diese kann gemäß Sommerlicher Wärmeschutznorm [DIN 4108-2 (2003)] als Zeitwert mit einem Grenzwert von 10 % für Temperaturkennwerte über 25, 26 bzw. 27°C oder gemäß aktueller Normfassung [DIN 4108-2 (2013)] als Produkt aus Überschreitungsbetrag [K] und Überschreitungszeit [h] mit einem Grenzwert von 500 Kh angegeben werden. Wendet man für die Auslegung der Patientenzimmer die relativen Überschreitungshäufigkeiten von Temperaturkennwerten an, so betragen die Grenzwerte für eine maximale operative Temperatur von 26°C für das Personal 14 %, für ältere Patienten 6 % sowie für Patienten im Kindesalter 0 %.

6.3.8. Schlussfolgerungen zur Raumklimaauslegung in Krankenhäusern

Zur Bewertung der Behaglichkeit für Krankenhauspatienten kommen unter den betrachteten Ansätzen ausschließlich statische Modelle in Frage, da weder von einer psychischen noch von einer physiologischen Anpassung von Patienten ausgegangen werden kann. Im vorhergehenden Kapitel wurden vier statische Verfahren auf ihre Ausgangsgleichungen zurückgeführt und auf unterschiedliche Patiententypen angewandt. Diese Anpassung erfolgte auf der Grundlage recherchierter physiologischer Kennwerte.

Die Anpassung der Modelle auf besondere Nutzereigenschaften ist beschränkt. So erzeugt eine Veränderung der Schweißverluste fragwürdige Ergebnisse und die Anpassung des Oberflächen- Volumen- Verhältnisses bzw. der körperlichen Speichermassen verändert die Ergebnisse nur marginal. Eine Anpassung der Kern- und Hauttemperaturen sowie des Grundumsatzes und der Bekleidungeigenschaften erzeugt plausible Ergebnisse. Aus dem Vergleich der Verfahrenskennwerte mit den praktischen Befragungen ist zu schlussfolgern, dass insbesondere die Modelle von Azer & Hsu (TSV) und Gagge (PMV(ET)) in der angepassten Form realistische Komfortbedingungen vorhersagen und für die Raumklimabewertung eingesetzt werden können. Die Ergebnisse dieser Modelle wurden daher näher betrachtet.

Als Richtwerte für die Planung von Krankenhausbereichen ergeben sich aus diesen Modellen folgende Schlussfolgerungen:

1. Für bettlägerige Patienten ist die Isolierwirkung des Bettsystems dominant, so dass der verminderte Grundumsatz keine Kompensation darstellt. Für diese Nutzergruppe liegt die Optimaltemperatur etwa 2°C unterhalb des Optimalwertes nicht- bettlägeriger Personen.
2. Unter den gewählten Nutzertypen sind Kinder die hitzeempfindlichste Nutzergruppe. Diese Erkenntnis beruht auf der Untersuchung des Einflusses erhöhter Neutraltemperaturen (Körperkern- und Oberflächentemperatur), eines erhöhten Grundumsatzes, einer erhöhten Schweißsekretionsrate sowie abweichender Speichermassen und Maße des kindlichen Körpers.
3. Für Kinder wurde eine Optimaltemperatur von ca. 21°C (Altersgruppe 10-14) ermittelt. Für das Personal und ältere Patienten liegen die Optimaltemperaturen bei ca. $22 - 23^{\circ}\text{C}$.

4. Die aus den Modellen abgeleiteten maximalen Operativtemperaturen für den Sommerfall betragen für (bettlägerige) Kinder 25°C , für ältere Patienten 28°C und für aktive Angestellte 31°C .

Aus den Mortalitätsuntersuchungen in Folge von Hitzewellen (6.2.6) sowie den Untersuchungen der Raumklimavorzügen von Senioren (Abschnitt 6.2.2) und Kindern (Abschnitt 6.2.1) wird deutlich, dass zur Festlegung von Grenzwerten in Krankenhäusern eine zeitliche Beschränkung von Abweichungen vom Komfortbereich notwendig ist. Im Falle des Azer/Hsu sowie der Gagge- Modelle kann diese Beschränkung mit Hilfe der Berechnungsindizes umgesetzt werden, da diese Modelle die Speicherfähigkeit des Körpers abbilden und damit kurzzeitige Raumklimaschwankungen adäquat bewerten. Der Idealfall ist daher die Berechnung und Beschränkung dieser Indizes, z.B. auf ± 0.5 , wie es von den jeweiligen Autoren empfohlen wird. Aus der Ermittlung der Häufigkeitsverteilung aller als behaglich bewerteten Operativtemperaturen konnte für den vereinfachten Anwendungsfall folgende Schlussfolgerung abgeleitet werden:

1. Die Überschreitungshäufigkeiten von 26°C sollten für bettlägerige Kinder 0%, für bettlägerige ältere Patienten 6% und für aktive Angestellte 14% nicht überschreiten.

7. Analyse der Raumtypen und Ableitung von baulichen Optimierungsansätzen

Das folgende Kapitel befasst sich mit einer bauklimatischen Analyse gängiger Patientenzimmertypen. Mit Hilfe des in Kapitel 5 kalibrierten Gebäudemodells können die gewählten Raumtypen hinsichtlich der im Sommerfall zu erwartenden raumklimatischen Bilanzverhältnisse bewertet werden. Daraus werden Ansatzpunkte für eine Verbesserung des baulichen Sommerlichen Wärmeschutzes für diese Raumtypen abgeleitet.

Die Bewertung der Raumtypen erfolgt für die in Kapitel 2 ermittelten allgemeinen und normativen Anforderungen an Patientenzimmer sowie für die in Abschnitt 6.3.7 ermittelten Raumklimaanforderungen (Behaglichkeitsmodelle). Zudem werden die aus Kapitel 5 ermittelten Nutzungsrandbedingungen angewandt.

7.1. Analyseansatz

Aus Kapitel 6.3.7 konnte entnommen werden, dass eine Beschränkung der Maximalwerte der Behaglichkeitsindizes zur Gewährleistung des sommerlichen thermischen Komforts eine hinreichende Bedingung ist. Daher ist für die Sommerfallbemessung keine Betrachtung einer Jahressimulation notwendig. Es genügt, die heißesten Tage des Jahres zu bewerten. Für diese Bewertung müssen, basierend auf den vorhergehenden Untersuchungen, Annahmen für die Nutzungsbedingungen, die Klimarandbedingungen, die Raumgeometrie und Bauteilkonstruktionen getroffen werden. Diese werden nachfolgend erläutert.

7.1.1. Auswahl der Berechnungsmodule

Für eine detaillierte Analyse der Wärmeströme und der resultierenden Oberflächentemperaturen ist es sinnvoll, die in der ersten Simulationsreihe in Abschnitt 4.4.1 erläuterten gewählten Standardmodule (siehe Übersicht in Abb.4.5) durch detaillierte Berechnungsmodule zu ersetzen. Abbildung 7.1 enthält eine Übersicht der angewandten Modelle.

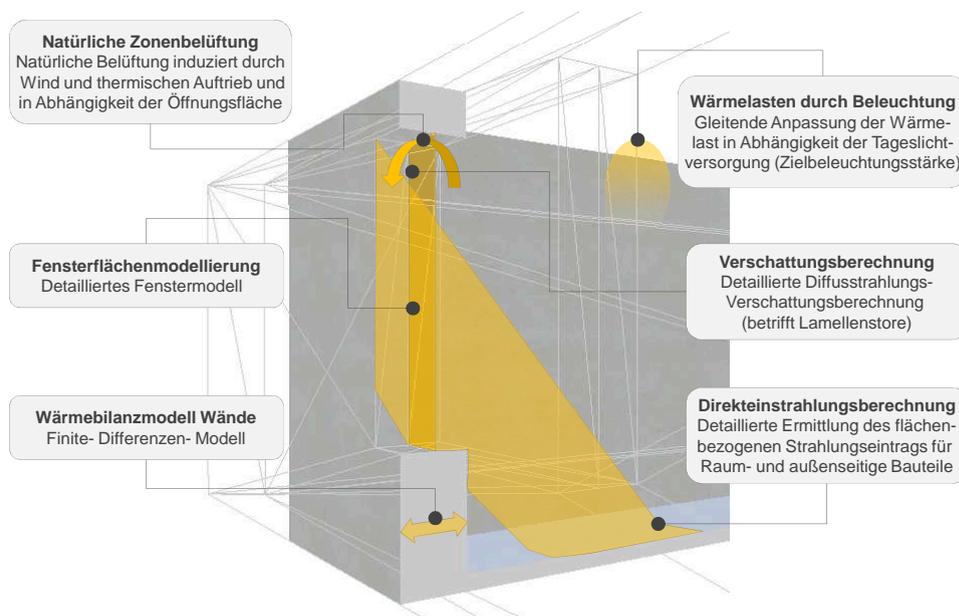


Abbildung 7.1.: Übersicht der ersetzten Standardmodelle im Simulationstool Energy Plus, Vers. 7.1.

Zur Berechnung des Luftwechsels aus Wind- und Auftriebsverhältnissen wird das in Energy Plus enthaltene Modell angewandt. Es wurde um einen Steuerungsplan für die Öffnungsfläche ergänzt. In diesem Modell werden aus den Temperaturen der Raum- und der Außenluft sowie aus der Gebäudehöhe die aus dem thermischen Auftrieb erzeugten Förderströme berechnet. Der durch Winddruck erzwungene Luftwechsel wird aus einem Koeffizienten für die Windrichtung sowie der Windgeschwindigkeit ermittelt. [Wetter, 2013, S. 307]

Für die Strahlungsberechnung wird das Modell zur detaillierten Innenraumstrahlungsberechnung angewandt. Darin wird an Hand des Einstrahlungswinkels der Sonne der Strahlungseintrag jedes einzelnen Innenbauteils erfasst. Im Standardmodell wird sämtliche einfallende Solarstrahlung der Bodenkonstruktion zugewiesen. In beiden Fällen, dem einfachen und dem detaillierten Modell, werden die reflektierte Direktstrahlungseinträge gemeinsam mit den Diffusstrahlungseinträgen flächengewichtet auf die anderen Innenbauteile verteilt. [Wetter, 2013, S. 158]

Die Ermittlung der Wärmeströme durch Fenster erfolgte über das detaillierte Fenstermodell in Energy Plus. Darin wird für jede Oberfläche der Fensterkonstruktion eine Wärmebilanzgleichung aufgestellt. Es sind hierfür zusätzliche Datensätze der Verglasungseigenschaften erforderlich. Diese enthalten Daten der front- und rückseitigen Transmissions- und Reflexionsgrade der Verglasung für eine senkrechte Sonneneinstrahlung und unterschiedliche Wellenlängen (250 bis 2500 nm). Im Gegensatz dazu genügt im einfachen Fenstermodell die Angabe von U- und SHGC-Wert. Daraus werden die übrigen Daten abgeleitet. [Wetter, 2013, S. 213]

Für die Modellierung der Bauteilwärmebilanzen wurde ebenfalls ein anderes Modell, eine Finite Differenzen Methode (FDM), gewählt. Im Standardmodell, der Conduction Transfer Methode (CTF), werden zu Beginn der Berechnung Koeffizienten ermittelt, welche die Rückführung des aktuellen Wärmestroms auf eine Historie von Wärmeströmen und Oberflächentemperaturen der jeweiligen Bauteilaußen- und -innenschicht erlauben. Diesem Ansatz liegt die Annahme zu Grunde, dass eine lineare Abhängigkeit zwischen der aktuellen Temperatur und dieser Historie existiert. Je massiver die Konstruktion ist und desto schwankender die Randbedingungen (Einstrahlung, Lüftung) sind, desto stärker kann diese Annahme von der Realität abweichen. Aus diesem Grund wurde das CTF- Modell durch ein FDM- Modell ersetzt. Letzteres berechnet für eine vorgegebene Anzahl von Bauteilschichten aus der Differenz ein- und austretender Wärmeströme die gespeicherte Wärmemenge. In der

7. Analyse der Raumtypen und Ableitung von baulichen Optimierungsansätzen

aktuellen Version von Energy Plus stehen zwei FDM- Modelle zur Auswahl. Für die Berechnung wurde die Fully Implicit First Order - Methode angewandt. [Wetter, 2013, S. 34 ff]

7.1.2. Auswahl der Außenklimabedingungen

Zur Analyse der gewählten Raumtypen wird eine fünftägige sommerliche Schönwetterphase betrachtet. Diese Phase wurde dem angepassten¹ aktuellen Testreferenzjahr des Deutschen Wetterdienstes (Veröffentlichungsjahr 2011) für die Zone 4, Referenzstation Potsdam, entnommen. Es handelt sich dabei um die fünf Sommertage im Juli (15.07. bis 20.07.), zu deren Ende das Jahresmaximum der Außenlufttemperatur erreicht wird. Die mittlere Außenlufttemperatur beträgt für diese Phase $25.8^{\circ}C$, das Maximum am 20.07. $36.1^{\circ}C$. Das Stundenmittel der horizontal gemessenen Globalstrahlung beträgt für den fünftägigen Zeitraum $445 \frac{W}{m^2}$.

7.1.3. Definition der Nutzungseigenschaften

Für die Nutzungseigenschaften werden die aus Abschnitt 5 über Simulationsstudien ermittelten Bedingungen verwendet.

Der Sonnenschutz wird ab einem Grenzwert der Horizontalstrahlung von $700 \frac{W}{m^2}$ und einer Raumlufttemperatur von $> 24^{\circ}C$ geschlossen. Der Lamellenwinkel beträgt konstant 45° . Im TRY- Datensatz wird keine Anpassung der Winddaten an Stadtverhältnisse vorgenommen und es sind keine Angaben zur maximalen stündlichen Windgeschwindigkeit enthalten. Es wurde aus diesen Gründen vereinfacht angenommen, dass der Sonnenschutz ab einer mittleren Windgeschwindigkeit von $6 \frac{m}{sec}$ hochgefahren wird.

Für die Lüftung wird eine permanente Kippstellung mit einer Öffnungsfläche von 10 % der Fensterfläche für eine Raumlufttemperatur von $> 24^{\circ}C$ veranschlagt. Der Grenzwert wurde niedriger gewählt als der im vorherigen Kapitel ermittelte Wert von $26^{\circ}C$, da die Räume kleinere Fensterflächen und daher geringere Temperaturniveaus aufweisen.

¹Es handelt sich hierbei um eine Anpassung des Außenlufttemperaturverlaufs an die Stadtverhältnisse von Dresden, d.h. inneres Stadtgebiet, Einwohneranzahl 500.000. Diese Anpassung wurde mit dem vom DWD veröffentlichten Tool vorgenommen. <http://www.bbsr.bund.de>.

Neben dem zeitabhängigen Luftwechsel wird zusätzlich ein permanenter Luftwechsel der mechanischen Lüftungsanlage veranschlagt. Dieser entspricht dem über die Abluftanlage im Sanitärbereich angesaugten Förderstrom von $40 \frac{m^3}{Pers \cdot h}$.

Für die Patienten wird das Anwesenheitsprofil D für zwei Kinder angenommen. Der Grundumsatz der Personen ist während des Tages auf den Leistungsumsatz gestiegen und damit um 50 % erhöht. Zusätzlich wird, bedingt durch Besucher und Personal, eine Erhöhung um 30 % während des Nachmittags angenommen. Die Summe der sensiblen Wärmeabgabe durch Personen beträgt im Stundenmittel 75 W.

Die Wärmelasten aus der Beleuchtung werden in Abhängigkeit der Belichtungsverhältnisse im Zimmer angepasst. Für eine Beleuchtungsstärke oberhalb oder gleich der Zielbeleuchtungsstärke von 200 Lux sind keine Wärmelasten aus der Beleuchtung vorhanden. Ist die berechnete Beleuchtungsstärke geringer, so wird die Wärmelast gleitend erhöht. Während der Nachtstunden ist lediglich eine Kontrollbeleuchtung vorhanden. Die resultierende Beleuchtungswärmelast schwankt zwischen ca. 15 und 120 W pro Raum.

7.1.4. Definition der Raumgeometrie und Konstruktionseigenschaften

Als Bewertungsgrundlage der ausgewählten Raumtypen soll eine Konstellation mit möglichst kleinem Fensterflächenanteil dienen. Zu diesem Zweck wurden für alle drei Raumtypen die nach der Tageslichtnorm DIN 5034-1 zulässigen Minimalflächen umgesetzt. Abbildung 2.3 auf Seite 37 veranschaulicht die in der Norm geforderten Fensterflächenmindestmaße.

Es wird deutlich, dass die Anforderungen der Norm zu sehr unterschiedlichen Situationen der Tageslichtversorgung führen. Das hängt unter anderem damit zusammen, dass die Mindestabmessungen der Glasfläche unabhängig von der Tiefe oder Größe des zu versorgenden Nutzungsbereiches sind. Der resultierende Glasflächenanteil ist auf Grund der gleichen Höhe der Räume in allen Fällen gleich und beläuft sich auf ca. 27 % der Fassadenfläche. Der nutzflächenbezogene Glasflächenanteil ist hingegen sehr unterschiedlich. Im I-Typ ist dieser Anteil mit 13 % am geringsten. Für den O-Typ beträgt er 15 % und für den T-Typ 26 %.

Für das Berechnungsbeispiel wurde eine Fensterkonstruktion mit einem mittleren U-

7. Analyse der Raumtypen und Ableitung von baulichen Optimierungsansätzen

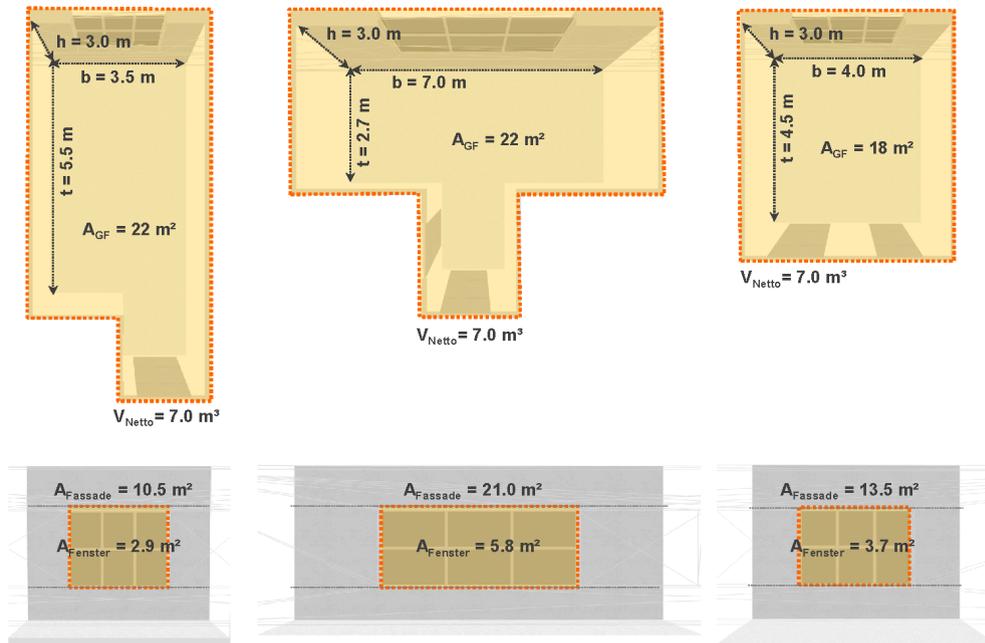


Abbildung 7.2.: Veranschaulichung der Patientenzimmermaße I-, T- und O-Typ für den Fall der minimalen Fensterflächengröße.

Wert von $1.45 \frac{W}{m^2K}^2$. Das Fenster weist einen Transmissionsgrad von 0.3 und einen SHGC- Wert³ (g-Wert) von 0.36 auf.

Die Konstruktionsaufbauten für die Außenwände wurden so gewählt, dass sie den gegenwärtigen umgesetzten Standards entsprechen. Es handelt sich um außenseitig gedämmte Betonkonstruktionen mit einem U-Wert von $0.155 \frac{W}{m^2K}$ sowie einem außenseitigen Absorptionsgrad von 0.5 (Solarstrahlung) bzw. 0.9 (IR-Strahlung). Die Bodenkonstruktion ist raumseitig mit einem PVC- Belag auf einer Estrichlage versehen. Die Raumdecke ist mit einer Deckenunterkonstruktion verkleidet. Sämtliche Trennwände wurden als Leichtbaukonstruktionen (Ständer mit Gipskartonverkleidung) modelliert.

²Dieser Wert wurde durch Energy Plus für die nach ASHRAE definierten Winterbedingungen berechnet. Dieser Wert entspricht einem U-Wert von $1.19 \frac{W}{m^2K}$ nach ISO 10292.

³SHGC = Solar Heat Gain Coefficient. Dieser Wert wurde nach ASHRAE- Randbedingungen ermittelt und entspricht etwa dem Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert).

7.2. Wärmebilanzen der einzelnen Raumtypen

Die erläuterten Raumkonstellationen sollen dazu dienen, die zu erwartenden Wärmequellen und Wärmesenken im Raum während der Sommerperiode zu analysieren. Aus dieser Analyse können Ansatzpunkte zur Verbesserung des Sommerlichen Wärmeschutzes für diese Raumtypen abgeleitet werden.

Zum Vergleich der Raumtypen untereinander wurden die Wärmeströme über die fünftägige Sommerphase gemittelt. Diese Mittelwerte sind in Abbildung 7.3 jeweils für die Wärmesenken und Wärmequellen eines Raumtyps zusammengefasst. Dem Betrag nach sind zwei Bilanzanteile von übergeordneter Bedeutung, die Wärmeeinträge durch die Fensterkonstruktion⁴ und die von den Speichermassen aufgenommenen Wärmeströme⁵.

Im Vergleich der Verhältnisse zwischen den Wärmegewinnen durch die Fenster und den von den Speichermassen aufgenommenen Wärmeströmen ist ein Unterschied zwischen den Raumtypen festzustellen. Der I-Typ weist den geringsten Wert (0.51) auf, d.h. in Bezug auf die Wärmelasten über das Fenster kann hier der größte Betrag in den Raumkonstruktionsmassen thermisch gespeichert werden. Im O-Typ stellt sich das Verhältnis etwas höher (0.61) und damit ungünstiger dar und im T-Typ ist es am höchsten (0.74).

Als Ursache für diese Unterschiede kommen vorrangig geometrische Eigenschaften der Räume in Frage. Die Verteilung wird zudem durch geringe Absorptionsgrade, d.h. hohe Reflexionsanteile der Oberflächen begünstigt. Da diese jedoch in allen Räumen gleich sind, sollen sie nicht näher betrachtet werden. Je größer die absorbierende Fläche eines Raums ist, desto effektiver kann die eintreffende Solarstrahlung von den Bauwerksmassen aufgenommen werden. In diesem Fall müssten sich vor allem Räume als vorteilhaft erweisen, bei denen das Verhältnis der Fensterfläche zur Gesamtfläche aller opaken Bauteile gering ist. Für die untersuchten Räume stimmen diese Verhältniskennwerte mit dem Einfluss der Speichermasse überein. Die Verhältnisse betragen im I-Typ 2.8 %, im O-Typ 4.6 % und im T-Typ 5.6 %.

⁴Diese Wärmeeinträge umfassen den Wärmestrom aus kurzweiliger, durch die Glasflächen transmittierter Solarstrahlung, langwellige, von der innersten Glasebene an den Raum abgegebene Strahlung sowie konduktive und konvektive Wärmeströme von der Fensterkonstruktion (einschließlich Rahmen, Stock, Sprossen) an die Raumluft. [EPlus IORef, 2012, S. 195, Output:WindowHeatGain]

⁵Hierfür wurde die Summe der positiven Wärmeströme in Richtung Wand auf der Innenseite aller Raumumfassungskonstruktionen bilanziert. [EPlus IORef, 2012, S. 191, Output:ZoneOpaqueSurfaceInside]

7. Analyse der Raumtypen und Ableitung von baulichen Optimierungsansätzen

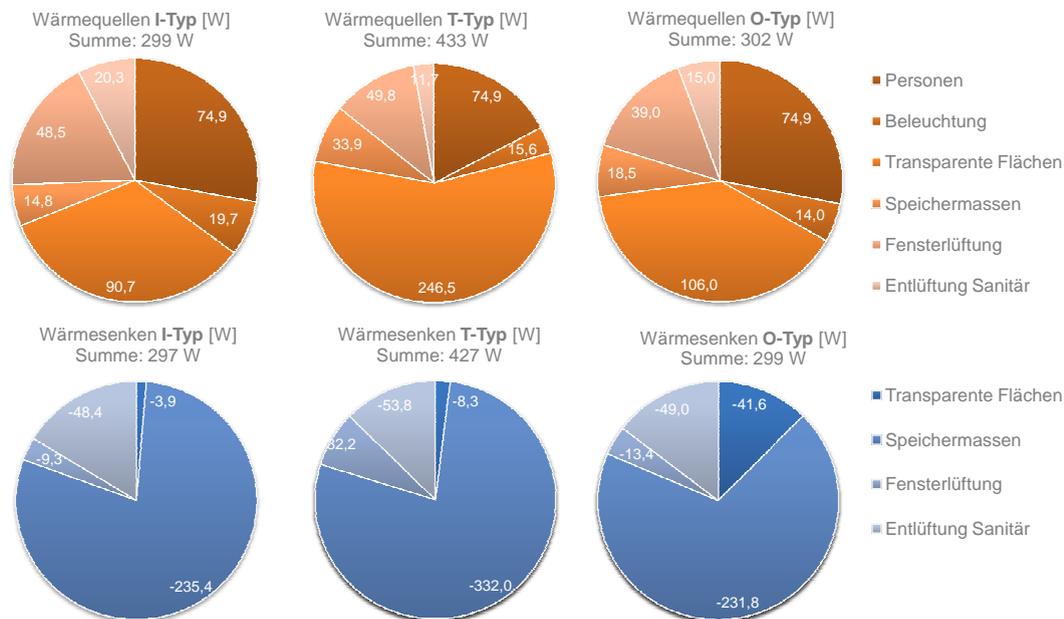


Abbildung 7.3.: Über die fünf Tage gemittelte Wärmequellen (rote Grafik) sowie Wärmesenken (blaue Grafik) der drei gewählten Raumtypen. Die Anordnung in der Legende entspricht der Anordnung der Segmente im Uhrzeigersinn (erstes Segment ab 0°)

7.3. Speicherwirksamkeit der Bauteile

Die Ausgleichswirkung der thermischen Speichermassen soll im Folgenden näher betrachtet werden. Auch für die Speicherwirkung der Bauteile wurden die Simulationsergebnisse der gewählten Sommerphase von fünf Tagen gemittelt. Die folgende Übersicht 7.4 enthält die Wärmestrommittelwerte der inneren Oberflächen, aufgeschlüsselt nach Bauteiltyp. Alle Wärmeströme in Richtung Bauteil werden dem Raum abgeführt und sind daher als Wärmesenken zu betrachten. Alle Wärmeströme in Richtung Raum werden diesem zugeführt und sind daher als Wärmequellen anzusehen. Es ist zu erwarten, dass die Speicherwirkung der Trennwände wegen ihres großen Flächenanteils am größten ist. Demzufolge müssten Decken- und Bodenfläche ähnliche Speicherwirkungen aufweisen. Aus den Außenwandflächen ist der geringste Einfluss zu erwarten.

Entgegen diesen Annahmen ist die Bodenfläche im I- und im O- Typ in Bezug auf die Wärmeabsorption das einflussreichste Bauteil. Das ist mit dem Auftreffen des Großteils der Strahlungslast auf diese Fläche zu begründen. Im T-Typ befindet sich

7.3. Speicherwirksamkeit der Bauteile

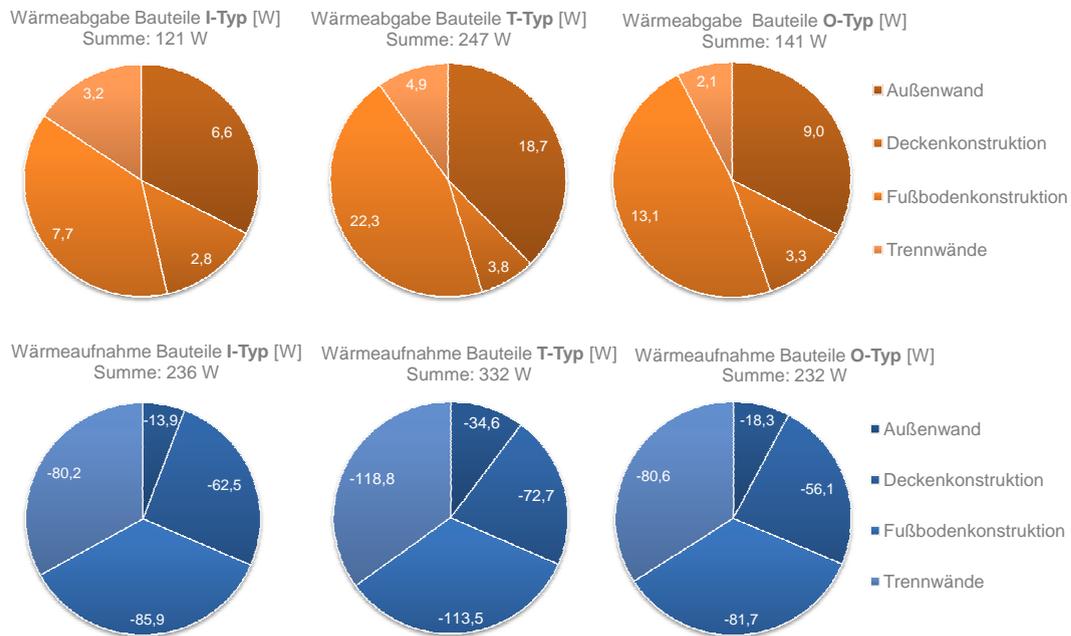


Abbildung 7.4.: Über die fünf Tage gemittelter Wärmestrom der inneren Bauteiloberflächen in Richtung Bauteil (Wärmeeintrag, blau) und in Richtung Raumluft (Wärmeabgabe, rot). Die Anordnung in der Legende entspricht der Anordnung der Segmente im Uhrzeigersinn (erstes Segment ab 0°)

ein Teil der Trennwände näher an der Fassade und ist daher ebenfalls stärker der Strahlung ausgesetzt. Decke und Außenwand sind in ihrer Speicherwirkung in allen Räumen an dritter und vierter Position einzuordnen.

Die Unterschiede zwischen den Speicherwirksamkeiten der unterschiedlichen Bauteile ist noch besser aus einer normierten, d.h. auf die jeweilige Fläche bezogenen, Gegenüberstellung zu erkennen. Abbildung 7.5 enthält diese Gegenüberstellung.

Es ist daraus deutlich zu erkennen, dass die Bodenkonstruktion mit Wärmestromdichten zwischen ca. 4 und 5 $\frac{W}{m^2}$ den effizientesten Beitrag zur Speicherwirkung des Raumes beiträgt.

Als Ansatz zur Verbesserung des sommerlichen Raumklimas ist aus dieser Analyse die Bedeutsamkeit der Bodenkonstruktionseigenschaften abzuleiten. Deren Wirksamkeit könnte beispielsweise durch eine Erhöhung des Absorptionsgrades, der Masse und der thermischen Leitfähigkeit verbessert werden. Eine Kombination mit einer Fußbodentemperierung (Kühlung) sollte diesen Effekt noch deutlich verstärken.

7. Analyse der Raumtypen und Ableitung von baulichen Optimierungsansätzen

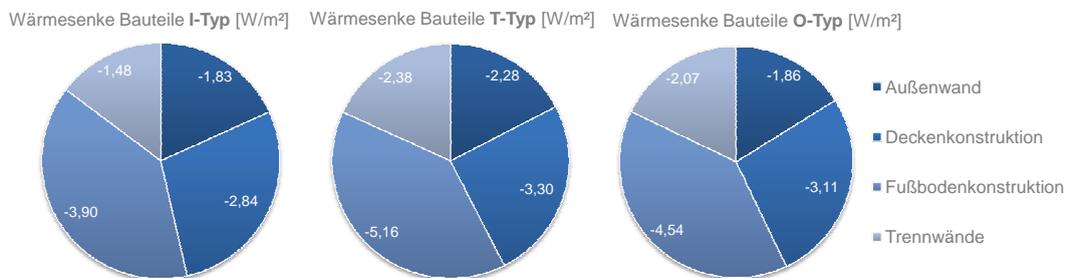


Abbildung 7.5.: Über die fünf Tage gemittelte Wärmestromdichten der inneren Bauteiloberflächen in Richtung Bauteil. Die Anordnung in der Legende entspricht der Anordnung der Segmente im Uhrzeigersinn (erstes Segment ab 0°)

7.4. Strahlungsdurchgang durch die Verglasung

Da in allen Räumen die gleiche Verglasung gewählt wurde, entsprechen sich auch die Anteile der Wärmeeinträge über die Fenster⁶. Zur Einschätzung der Anteile dieser Wärmeeinträge wurden die Wärmeströme auf der Innenseite der Fensterkonstruktion in Abbildung 7.6 bilanziert. Sie wurden in die Anteile der durchgelassenen diffusen und direkten kurzwelligeren Strahlung sowie die Anteile der langwelligen und konvektiven Wärmeeinträge von der Scheibenoberfläche in den Raum eingeteilt.

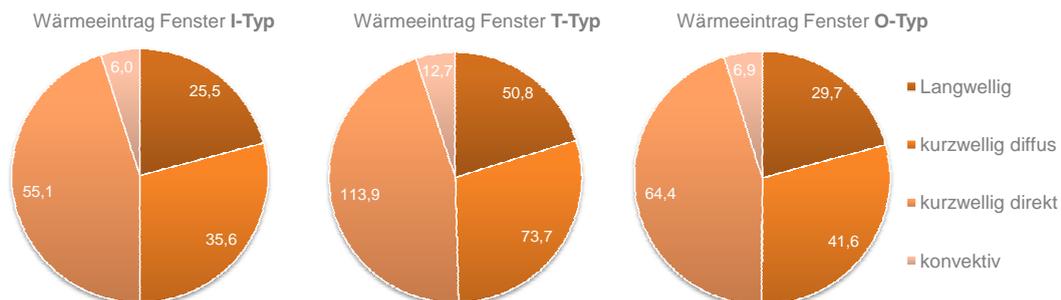


Abbildung 7.6.: Über die fünf Tage gemittelte Wärmeströme der inneren Fensteroberfläche in Richtung Raumluft. Die Anordnung in der Legende entspricht der Anordnung der Segmente im Uhrzeigersinn (erstes Segment ab 0°)

Die Verluste wurden in dieser Aufstellung nicht analysiert da deren Beträge ver-

⁶Die geringen Unterschiede in den Anteilen sind auf die unterschiedlichen Temperaturniveaus in den Räumen zurückzuführen. Die langwellige Strahlungsbilanz der raumseitigen Glasoberfläche und die konvektiven Verluste sind von den Temperaturen der Raumluft und der Oberflächen abhängig.

7.5. Luftwechsel aus natürlicher Belüftung und mechanischer Entlüftung

nachlässigbar klein sind. Sie betragen im Periodenmittel und im Durchschnitt aller drei Räume etwa $1.2 \frac{W}{m^2}$. Die Wärmeeinträge belaufen sich im Gegensatz dazu auf Werte um $40 \frac{W}{m^2}$ im Periodenmittel.

Aus der Aufstellung ist zu erkennen, dass die direkten und diffusen Transmissionsanteile der Solarstrahlung den größten Einfluss auf die sommerliche Wärmebilanz nehmen. Deren Anteil an den Gesamtwärmeeinträgen über das Fenster beträgt etwa 76 %. Dieser Anteil besteht aus 46 % Direktstrahlungseintrag und 30 % Diffusstrahlungseintrag. Dieser Diffusstrahlungseintrag ist relativ hoch. Das liegt daran, dass die Diffusstrahlung ungerichtet bzw. mit homogen verteilten Einfallswinkeln⁷ auf die Verglasung trifft. Treten große Direktstrahlungseinträge auf, so ist gleichzeitig der Sonneneinfallswinkel sehr hoch. Da der Reflexionsanteil einer Verglasung proportional zum Einfallswinkel ist, bewirkt ein hoher Sonnenstand einen großen Reflexionsanteil und folglich einen geringen Transmissionsanteil.

In der Betrachtung der Brutto- und Nettowärmeströme durch das Fenster einschließlich Rahmen und Sonnenschutz ergeben sich folgende Kennwerte. Der Globalstrahlungseintrag auf eine Horizontalfläche (Kennwert des Wetterdatensatzes) beträgt im Mittel der fünftägigen Phase $447 \frac{W}{m^2}$. Davon sind $57 \frac{W}{m^2}$ Diffusstrahlung und $390 \frac{W}{m^2}$ Direktstrahlung. Auf die Außenseite der Fensterkonstruktion treffen im Mittel $46 \frac{W}{m^2}$ Diffusstrahlung und $193 \frac{W}{m^2}$ Direktstrahlung auf. Auf der Innenseite der Fensterkonstruktion gelangen davon im Mittel $12 \frac{W}{m^2}$ diffus und $19 \frac{W}{m^2}$ direkt in den Raum. Es ist daraus zu erkennen dass der Diffusstrahlungseintrag in Relation zum Direktstrahlungseintrag relativ hoch ist.

Zur Verbesserung des sommerlichen Wärmeschutzes der Raumtypen ist daraus abzuleiten, dass eine Abschattung der Direktstrahlung eine Reduktion um etwa 60 % der Wärmeeinträge über das Fenster ermöglicht.

7.5. Luftwechsel aus natürlicher Belüftung und mechanischer Entlüftung

Ein hygienischer Mindestluftwechsel ist für Patientenzimmer, wie in Kapitel 2 erläutert, nur in der höchsten Nutzungskategorie erforderlich. Für die untersuchten

⁷Der Sonneneinfallswinkel entspricht dem Winkel zwischen der Flächennormalen und dem Winkel mit welchem die Solarstrahlung auf die Oberfläche auftrifft. Beträgt der Sonneneinfallswinkel 0° , so stimmen beide Winkel überein.

7. Analyse der Raumtypen und Ableitung von baulichen Optimierungsansätzen

Patientenzimmertypen wurde davon ausgegangen, dass der Mindestförderstrom von $40 \frac{m^3}{Pers \cdot h}$ bereitzustellen ist und über die Abluftanlage der Sanitärzelle gewährleistet wird. Es ist nicht gesichert, dass der angenommene Förderstrom tatsächlich als Außenluft über die Fassadenfugen und Fensteröffnungen der Patientenzimmer in die Sanitärzelle gelangt. Es besteht das Risiko, dass ein erheblicher Anteil Innenraumluft aus angrenzenden Zonen, d.h. dem Flur, in die Sanitärzelle gelangt.

Für die natürliche Belüftung der Räume wurde aus dem vorherigen Kapitel ein Fensteröffnungsprofil ermittelt, in welchem die Fenster in Kippstellung geöffnet werden sobald die Raumlufttemperatur einen Grenzwert von $26^\circ C$ überschreitet.

Aus den angesetzten Randbedingungen ergibt sich im Tagesmittel ein Luftwechsel von, je nach Typ, 3 bis $5 \frac{VE}{h}$. Davon werden 1.2 bis $1.6 \frac{VE}{h}$ über die Abluftanlage bereitgestellt und 1.8 bis $3.6 \frac{VE}{h}$ über die Fensteröffnung.

Der Vorteil der mechanischen Lüftungsanlage ist darin zu sehen, dass sie auch außerhalb der Einstrahlungszeiten, d.h. bei hohen Temperaturdifferenzen zwischen Innen- und Außenluft, betrieben wird. Sie leistet damit den wichtigsten Beitrag zur Abkühlung der Bauwerksmassen während der Nachtstunden. Im Mittel der fünf Sommertage werden je nach Raumtyp ca. 40 bis 50 W über die Abluftanlage abgeführt. Hinzu kommen ca. 10 bis 30 W über die Fensterlüftung. Während des Tages kehrt sich dieses Verhältnis um. Dann erzeugt die Lüftung vorwiegend Wärmeeinträge in einer Höhe von ca. 10 bis 20 W über die Abluftanlage und ca. 30 bis 40 W über die Fensterlüftung.

Zur Optimierung des Sommerlichen Wärmeschutzes ist daraus abzuleiten, dass die Abluftanlage effektiv für die morgendliche oder nächtliche Abkühlung der Bauwerksmassen genutzt werden kann. Außerhalb der Zeiten hoher Außenlufttemperaturen kann, sofern gleichzeitig komfortable Raumluftbedingungen vorherrschen, der Förderstrom erhöht werden. In der übrigen Zeit sollte die Fensterlüftung reduziert werden, da diese erhebliche Wärmeeinträge verursacht.

7.6. Tageslichtversorgung

Anforderungen an die Tageslichtversorgung werden gemäß Kapitel 2 in Form von minimalen Tageslichtquotienten gestellt. Für Patientenzimmer sollte ein Tageslichtquotient von 0.9 % sichergestellt werden. Dieser Wert ist auf den Flächenschwerpunkt

der Raumfläche in einer vorgegebenen Höhe bezogen. Da diese Raummitte in Patientenzimmern jedoch nicht den Hauptaktionsbereich darstellt, wurde der Bezugspunkt angepasst. Die nachfolgende Abbildung 7.7 enthält eine Übersicht der räumlichen Verteilung der Tageslichtquotienten für die untersuchten drei Patientenzimmertypen. Zur Bewertung der Versorgungsqualität sind für zwei mögliche Bettstandorte (Sensor 1, Sensor 2) die Tageslichtquotienten angegeben.

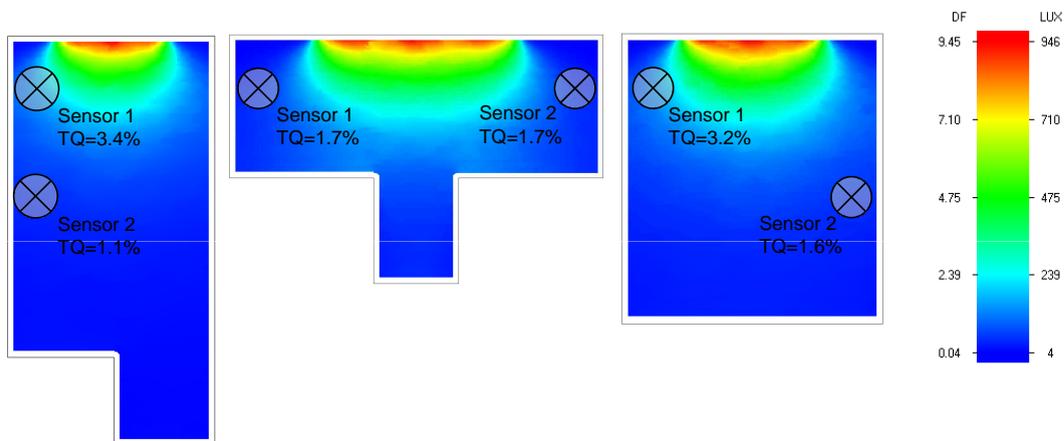


Abbildung 7.7.: Tageslichtquotientkarten der Patientenzimmertypen für den bedeckten Himmel mit einer Beleuchtungsstärke im Außenraum von 10.000 Lux(CIE-6). Angegeben sind, stellvertretend für die Kopfposition der Patienten in ihren Betten, zwei Sensorplatzierungen für welche der Tageslichtquotient berechnet wurde.

Aus dieser Übersicht ergeben sich im Wesentlichen zwei Schlussfolgerungen. Erstens unterscheidet sich die Tageslichtversorgung der beiden Bettpositionen erheblich zwischen den Raumtypen. Die größte Differenz ist im I-Typ gegeben. Dort wird der minimale Tageslichtquotient von 0.9% für die hintere Bettposition mit geringem Sicherheitszuschlag erreicht. Im O-Typ sind die Tageslichtverhältnisse etwas ausgewogener und im T-Typ identisch. In diesen beiden Typen ist die Minimalanforderung mit größerem Sicherheitsbereich erfüllt. Die zweite Schlussfolgerung ergibt sich aus dem Vergleich der Sensorstandorte, d.h. der angenommenen Kopfposition der Patienten, und der Tageslichtverteilung. Das Maximum der Tageslichtversorgung wird in Raummitte bereitgestellt während die Position der Patienten im Randbereich ist.

Für die Entwurfsoptimierung dieser Raumtypen ist daraus abzuleiten, dass eine Verkleinerung der Fensterfläche insbesondere im T- und O- Typ möglich ist. Wird die Fensterfläche am Rande der Raumfassade platziert, so kann dabei die Quali-

7. Analyse der Raumtypen und Ableitung von baulichen Optimierungsansätzen

tät der Tageslichtversorgung in den entscheidenden Versorgungsbereichen (Kopfteil des Krankentettes) aufrecht gehalten werden. Es ist darüber hinaus noch zu klären, ob eine höhere Platzierung der Fensterfläche eine relevante Verbesserung der Versorgungsqualität gewährleistet. In diesem Fall muss eine Abwägung mit den Anforderungen an den Ausblickbereich der Patienten erfolgen.

Des Weiteren ist festzustellen, dass die nach Norm geforderte Mindestglasfläche in allen Fällen die minimale Tageslichtanforderung gewährleistet. Allerdings führt sie zu einer sehr unterschiedlichen Versorgungsqualität. Eine Abhängigkeit der Mindestglasfläche von der Raumfläche erscheint daher sinnvoller als eine Abhängigkeit von der Fassadenfläche.

7.7. Raumklimabewertung

Im Folgenden wird die Behaglichkeitsbewertung am Beispiel einer älteren, bettlägerigen Person auf der Grundlage von Abschnitt 6.3.7 vorgenommen. In Abbildung 7.8 sind die Verläufe der TSV- Indizes für die Sommerphase und für die erwähnte Personengruppe abgebildet.

Die Auswertung ergibt für alle Raumtypen sehr unbehagliche Raumklimabedingungen. Zu etwa 50 % dieser Sommerphase liegen die Indexwerte außerhalb des Komfortbereichs. Die maximalen Indexbeträge belaufen sich auf 1.03 (I-Typ), 1.14 (O-Typ) sowie 1.22 (T-Typ). Es ist daraus zu schlussfolgern, dass selbst die für die Tageslichtversorgung minimal geforderte Verglasungsfläche der Patientenzimmer ein unbehagliches Raumklima verursacht.

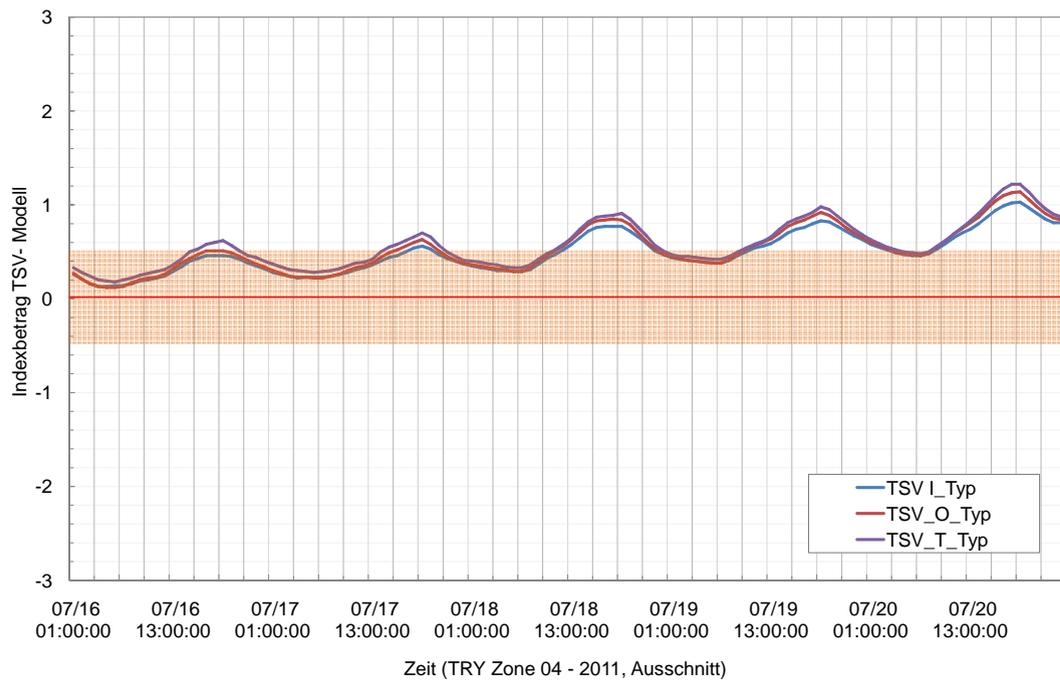


Abbildung 7.8.: Bewertungsindizes für die gewählte fünftägige Sommerphase für das TSV- Modell mit den Eingabedaten für eine ältere bettlägerige und leicht bedeckte Person. Die rote Linie kennzeichnet das Optimum (Indexwert 0). Der rote Bereich kennzeichnet den behaglichen Bereich (Indexwert -0.5 bis +0.5).

7.8. Optimierungsansätze

Der im I- Typ geforderte minimale Fensterflächenanteil entspricht etwa dem Wert, welcher für die Tageslichtversorgung erforderlich ist. Dennoch wird in diesem Raumtyp unter den ermittelten Nutzungsrandbedingungen (Sonnenschutzsteuerung, Lüftung u.a.) sowie den vorgegebenen Konstruktionsrandbedingungen kein behagliches Raumklima erzielt. Für den O- und den T-Raumtyp stellen sich die Raumklimabedingungen noch unbehaglicher dar. Hier ist in jedem Fall eine Reduktion der Strahlungseinträge anzuraten. Diese kann entweder direkt, über eine Verkleinerung und effizientere Platzierung der Fensterfläche, oder indirekt, über einen effizienteren Sonnenschutz verkleinert werden.

Fest installierte Sonnenschutzsysteme sollte dabei so konzipiert sein, dass die für die Tageslichtversorgung relevante Diffusstrahlung nur minimal geschwächt wird. Variable Sonnenschutzsysteme sollten effizient und folglich zentral gesteuert werden.

Erfolgt eine Anpassung der Öffnungsfläche, so sollten Platzierung und Bemessung bedacht werden. Möglich wäre eine Aufteilung der Öffnungsflächen in zwei Hauptbereiche, einen möglichst weit oben in der Fassadenfläche platzierten Bereich für die Tageslichtversorgung und einen etwas tiefer platzierten Bereich für den Ausblick. Der Tageslichtbereich sollte dabei möglichst wenig Direktstrahlung passieren lassen, d.h. effizient verschattet werden können. Der Ausblickbereich könnte dem Patienten zusätzlich für die individuelle Belüftungs- und Verschattungseinstellung überlassen werden.

Einen weiteren Ansatz stellt die Optimierung der Belüftung dar. Die im Sanitärbereich erforderliche Abluftanlage könnte während der sommerlichen Nachtstunden mit einem erhöhten Förderstrom gefahren werden um die thermische Entladung, d.h. Auskühlung, der Raumbauteile zu verbessern. Zur Beschleunigung des Auskühlvorgangs, sowie des tagsüber stattfindenden Aufheizvorgangs dieser Speichermassen, sollten insbesondere die Bodenkonstruktionen mit einer hohen thermischen Leitfähigkeit versehen werden.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, eine Planungsmethode zur Bemessung des thermischen Verhaltens, d.h. des Sommerlichen Wärmeschutzes, anspruchsvoller Bauten bereitzustellen. Unter der Vielzahl bestehender Planungswerkzeuge wurden im ersten Teil dieser Arbeit verschiedene Handrechenverfahren und ein Simulationsverfahren näher betrachtet und an Hand von Messungen in verschiedenen Bauten des Universitätsklinikums Dresden (UKD) bewertet. Dabei wiesen die Verfahren jeweils unterschiedliche Einsatzbereiche in Bezug auf die Planungsphasen, Detaillierungsgrade und den baulichen Maßstab auf.

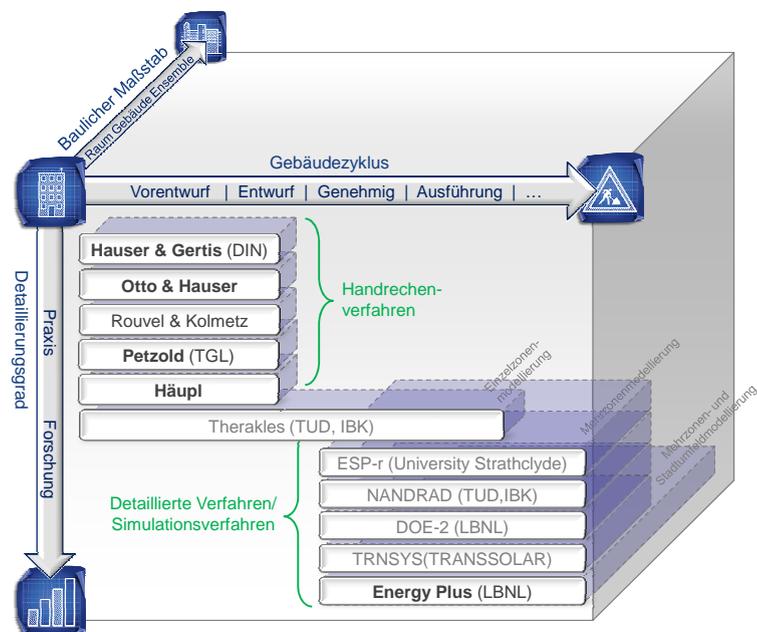


Abbildung 8.1.: Einordnung der in dieser Arbeit betrachteten Verfahren gemäß ihres potenziellen Einsatzbereiches im entsprechenden Planungsstand, Detaillierungsgrad und baulichen Maßstab. Die untersuchten Verfahren sind schwarz hervorgehoben.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Es stellte sich heraus, dass keines der in dieser Arbeit betrachteten Handrechenverfahren eine sichere Prognose des sommerlichen Überhitzungsrisikos gewährleistet, was insbesondere auf die starken Vereinfachungen dieser Verfahren zurückzuführen war. Gegenüber den Handrechenverfahren identifizierten die Simulationsrechnungen alle kritischen Räume. Sie überschätzten dabei jedoch das Überhitzungsrisiko erheblich, was insbesondere auf die unrealistischen Randbedingungen zurückzuführen war. Diese Erkenntnis führte zu der Frage, wie zukünftig die Vorbemessung des Sommerlichen Wärmeschutzes durchgeführt werden kann. Denn aus Abb. 8.1 ist damit ersichtlich, dass insbesondere für die frühen Planungsphasen geeignete Werkzeuge bzw. Bemessungsmethoden fehlen.

Die Füllung dieses Vakuums könnte über den Transfer der Simulationswerkzeuge in die allgemeine Planungspraxis und dabei auch in diese frühen Planungsphasen gelingen. Aussichtsreich ist die Bereitstellung vereinfachter und nutzerfreundlicher Simulationswerkzeuge welche auf den spezifischen Einsatzbereich zugeschnitten sind. Ein solches Tool für die Bemessung des Sommerlichen Wärmeschutzes ist das am Institut für Bauklimatik der TUD entwickelte Tool Therakles.

Für den erfolgreichen Einsatz eines solchen Tools bedurfte es jedoch der Beseitigung zweier wesentlicher Unzulänglichkeiten der Simulationsverfahren, der unbekannten Randbedingungen und der fehlenden raumklimatischen Auswertungsansätze.

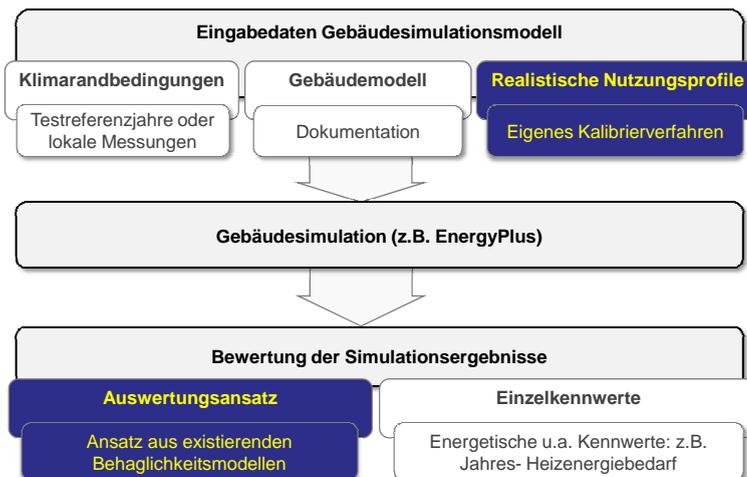


Abbildung 8.2.: Lösungsansätze (dunkelblau hervorgehoben) dieser Arbeit zur Verbesserung der Aussagefähigkeit von Simulationsmodellen und folglich für den Transfer der Simulationswerkzeuge in die Planungspraxis

Die vorliegende Arbeit enthält Lösungsansätze für beide Punkte. Zur Lösung des ersten Problems wurde eine Kalibrieremethode für die Bestimmung der zeitabhängigen Nutzungsbedingungen (Nutzungsprofile) auf der Grundlage von Raumklimamessreihen, Stichproben sowie aus lokalen Außenklimamessungen (Messstation UKD) entwickelt. Im Ergebnis dieser Methode konnten, für die in dieser Arbeit untersuchten Räume, die Nutzungsbedingungen identifiziert und damit die Übereinstimmung (Kennwerte Raumklima, Korrelation) zwischen der gemessenen und der simulierten Raumlufttemperatur deutlich verbessert werden. Dieses Verfahren stellt sich in seinen Teilschritten wie folgt (Abb. 8.3) dar.

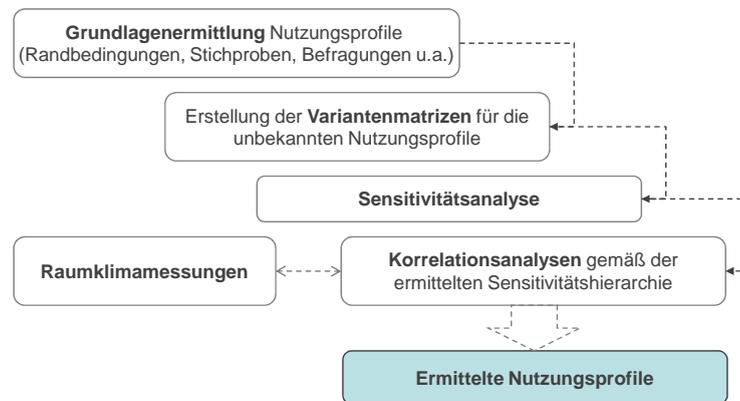
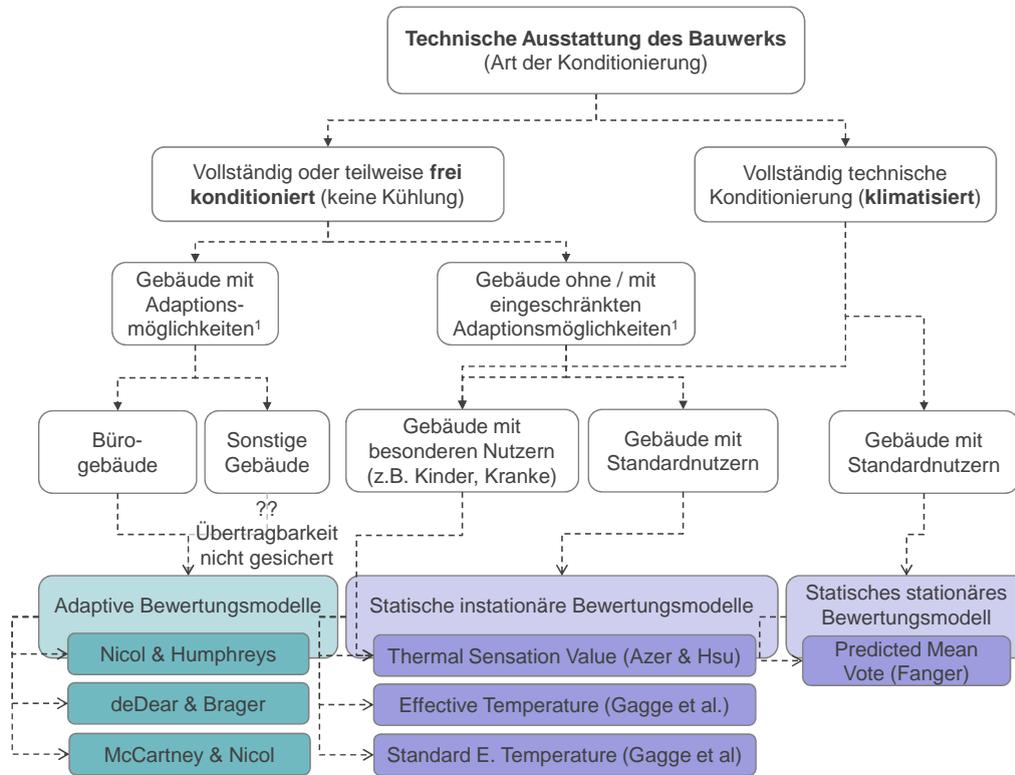


Abbildung 8.3.: Kalibrierverfahren für die Ermittlung von unbekanntenen Nutzungsprofilen.

Das Problem unzureichender Auswertungsansätze wurde mit Hilfe existierender Komfortbewertungsmodelle gelöst. Von den beiden erörterten Ansätzen, statische und adaptive Modelle, kam lediglich der erste Ansatz für die Anwendung auf Klinikbauten in Frage. Die physiologischen Besonderheiten unterschiedlicher Nutzertypen im Krankenhaus wurden aus Literaturquellen zusammengetragen und in vier statische Modelle implementiert. Im Vergleich mit praktischen Befragungen zum Komfort in Klinikbauten wurden die Ergebnisse dieser Modelle verifiziert. Aus den Berechnungen des am besten geeigneten Modells (TSV) wurden auch vereinfachte Kriterien zur Raumklimaauslegung für unterschiedliche Nutzertypen in Form von optimalen Operativtemperaturen und Häufigkeitsverteilungen der behaglichen Operativtemperaturen abgeleitet. Aus den durchgeführten Literaturstudien und Berechnungen ergab sich zudem eine allgemeine Handlungsanweisung für die Anwendung von Behaglichkeitsmodellen auf unterschiedliche Bautypen. Diese enthält Abbildung 8.4.

8. Zusammenfassung und Ausblick



¹ Unter Adaption ist die Anpassung der Raumklimaempfindung durch den Gebäudenutzer zu verstehen, z.B. durch Anpassung der Bekleidung, Öffnen der Fenster, Standortwechsel

Abbildung 8.4.: Anwendbarkeit der Behaglichkeitsmodelle zur Raumklimabewertung unterschiedlicher Gebäudetypen.

Im Ergebnis der Arbeit zeigte sich, dass die Simulation im Vergleich zu den vereinfachten Methoden große Vorteile und einige Nachteile aufweist. Beides liegt in der Komplexität der Modelle begründet. So können physikalische Prozesse mit dem Simulationsverfahren immer detaillierter und realitätsnäher abgebildet werden. Gleichzeitig aber mangelt es den Simulationsverfahren an Anwendungsszenarien. Dieser Mangel wird ansatzweise durch die Neuausrichtung in den Normenausschüssen behoben, in denen zunehmend Randbedingungen und Qualitätsstandards für den Simulationsnachweis Berücksichtigung finden. In Bezug auf den Sommerlichen Wärmeschutz ist der aktuelle Stand jedoch ungenügend. Die verfügbaren Anwendungshinweise sind noch stark an die einfachen Handrechenverfahren angelehnt und widerspiegeln keine realen Nutzungsbedingungen, Klimate und Behaglichkeitsempfindun-

gen. Insbesondere für den ersten Punkt mangelt es erheblich an praktischen Untersuchungen und theoretischen Modellen. Da die physikalischen Modelle und numerischen Verfahren jedoch eine große Exaktheit erreicht haben, sind die Nutzungsrandbedingungen derzeit als maßgeblich begrenzender Faktor für die Aussagefähigkeit der Simulationsrechnungen zu bewerten. Es sollten daher intensiv Bemühungen zur Erfassung von Nutzungskennwerten und zur Entwicklung von Interaktionsmodellen zwischen Personen und Gebäuden vorangetrieben werden.

Abbildungsverzeichnis

1.1. Einordnung ausgewählter Gebäudesimulationsverfahren im Kontext der Planungs- und Maßstabebenen eines Bauwerks sowie Darstellung der angestrebten Transferrichtungen und der in dieser Arbeit behandelten, erforderlichen Voraussetzungen für den Praxistransfer.	23
2.1. Funktionelle Anforderungen Patientenzimmer. Links: Dreiseitiger Bettzugang für das Personal, medizinische Versorgungseinheit (Strom, Gase, Notruf u.a.) am Bett, separate Bewegung der Betten. Rechts: Eigener Bewegungsbereich für die Patienten, Nachttisch, Anbindung an Versorgungseinheit (Leuchte, Telefon u.a.), Sitzbereich, angegliederter Sanitärtrakt	31
2.2. Gestalterische Anforderungen. Links: Sichtbeziehungen im Patientenzimmer mit Ausblick, Sichtbeziehung zum Bettnachbarn und Einsicht des Zugangsbereichs. Rechts: Privat- und Kommunikationsbereich im Patientenzimmer	36
2.3. Mindestabmessungen der verglasten Fassadenfläche im Patientenzimmer gemäß DIN 5034-1.	37
2.4. Beispiel für einen I-förmigen Patientenzimmergrundriss mit zwei Betten. Der große Pfeil markiert den Raumzugang, der kleine den Zugang zum Sanitärtrakt. Der Grundriss ist an die in [Nickl-Weller, 2007] und [Broto, 2009] aufgeführten Projekte angelehnt.	43
2.5. Links: Beispiel für einen O-förmigen Patientenzimmergrundriss für zwei Personen. Rechts: Beispiel für einen V-förmigen Patientenzimmergrundriss für zwei Personen. Der große Pfeil markiert den Raumzugang, der kleine den Zugang zum Sanitärtrakt. Die Grundrisse sind an die in [Nickl-Weller, 2007] und [Broto, 2009] aufgeführten Projekte angelehnt.	44

Abbildungsverzeichnis

- 3.1. Einordnung ausgewählter Verfahren zur Bewertung des Sommerlichen Wärmeschutzes gemäß Gebäudezyklus, Detaillierungsgrad und baulichem Maßstab. 48
- 3.2. Übersicht der modularen Struktur von Energy Plus. Linksseitig sind die an die Oberflächenwärmebilanz angekoppelten Module dargestellt. Darüber hinaus sind verschiedene Module der Gebäudetechnik verknüpfbar. Die Abbildung wurde sinngemäß aus [Wetter, 2013, S.6] übernommen. 60
- 4.1. Fassadenansichten der Gebäude des Universitätsklinikums Carl Gustav Carus Dresden, in denen Raumklimamessungen durchgeführt wurden: Gebäude 21 (Kinder- und Frauenklinik), Gebäude 58 (Notaufnahme, Chirurgie), Gebäude 59 (Chirurgisches Operatives Zentrum). 64
- 4.2. Messdatenauswertung der Phase Juli bis Dezember 2010: Kastengrafik-Darstellung (Boxplot) sowie Überschreitungshäufigkeit von $26^{\circ}C$ und Unterschreitungshäufigkeit von 30% in den einzelnen Räumen. Die Kanten der Boxplot- Grafik geben nicht die Quartile sondern die Standardabweichung an. Die Räume wurden entsprechend der gemessenen Überschreitungshäufigkeit von $26^{\circ}C$ sortiert. Räume mit der Kennung [K] sind klimatisiert, alle übrigen Räume sind nicht klimatisiert. Die Barken der Häufigkeitskennwerte geben den Messunsicherheitsbereich an. 66
- 4.3. Darstellung der Verfahrensergebnisse nach Hauser & Gertis (Sonneneintragskennwert), Petzold (äußere Wärmestromdichte), Häupl (Tagesmitteltemperatur) und Hauser % Otto (Übertemperaturgradstunden) für die nicht klimatisierten Räume. Die Räume sind entsprechend ihrer gemessenen Überschreitungshäufigkeit angeordnet. Negative Abweichungen des berechneten Kennwertes zum Grenzwert (zulässige Räume) sind grün dargestellt, positive Abweichungen sind orange dargestellt. 70

4.4.	Darstellung der Verfahrensergebnisse und der Messergebnisse als Quotient aus zulässigem und vorhandenem Wert für alle nicht klimatisierten Räume in den Bauten des Universitätsklinikums in der Messphase I (Juli-Dezember 2010). Die Messwerte wurden ebenfalls als Quotient aus Ist- Wert (gemessene relative Überschreitungshäufigkeit von 26°C) und Grenzwert (10 %) dargestellt. Werte über einem Verhältnis von 1 (100 %) bedeuten, dass der betreffende Raum nach Messung bzw. nach Bewertung unzulässig ist. Die Abweichungskennzeichnung zwischen Messwert und Kennwert ist orange sofern der Messwert den Kennwert überschreitet und grün sofern der Kennwert oberhalb des Messwertes liegt.	74
4.5.	Berechnungsansätze bzw. Modellauswahl für die Simulationsrechnungen mit EnergyPlus Vers. 7.1	79
4.6.	Ergebnisse der Simulationsrechnungen für die in Messphase I (Juli-Dezember 2010) gemessenen nicht klimatisierten Räume des Universitätsklinikums Dresden. Die Abbildungen enthalten die simulierte Überschreitungshäufigkeit von 26°C im Vergleich zum gemessenen Wert. Die Räume sind entsprechend der Messwerte sortiert. Die rechtsseitig dargestellten Werte wurden mit den Testreferenzjahren der Jahre 2004 und 2010 (Zone 4) ermittelt. Die linksseitig dargestellten Simulationsergebnisse wurden mit dem zeitgleichen Wetterdatensatz Dresden- Klotzsche berechnet.	82
5.1.	Ansichten der Fassade der Kinder- und Frauenklinik des Universitätsklinikums Dresden.	86
5.2.	Vogelperspektivische Darstellung der Patientenzimmertypen in denen Messungen durchgeführt wurden und Zuordnung der jeweiligen Raumkennungen zu diesen Typen.	87
5.3.	Messdatenauswertung der Phase Juli bis Dezember 2011: Kastengrafik-Darstellung (Boxplot) sowie Häufigkeitsverteilungskennwerte der Lufttemperatur und Raumluftfeuchte in den Patientenzimmern. Die Kastengrafik-Darstellung wurde abgewandelt. Die Kanten geben nicht die Quartile sondern die Standardabweichung der Datenpunkte an. Die Räume sind gemäß der gemessenen Überschreitungshäufigkeit von 26°C sortiert.	89

Abbildungsverzeichnis

5.4. Eingabedatenübersicht des Simulationsmodells. Die nicht vorhandenen Bedingungen bzw. Nutzungsprofile sind farblich gekennzeichnet.	91
5.5. Boxplot- Darstellung der Raumlufttemperaturkennwerte der Messung und der Basissimulation (oben) sowie Überschreitungshäufigkeit für drei verschiedene Lufttemperaturwerte (unten). In der Boxplot- Darstellung bildet die Box nicht die Quartile sondern die Standardabweichung ab. Raum 21.0.232 und 21.1.121 wurden nicht simuliert.	92
5.6. Einflussfaktoren Sonnenschutzaktivierung.	96
5.7. Steuerung des Sonnenschutzes der äußeren Westfassade der Kinder- und Frauenklinik des Universitätsklinikums Dresden an einem Strahlungstag.	98
5.8. Steuerung des Sonnenschutzes der äußeren Ostfassade der Kinder- und Frauenklinik des Universitätsklinikums Dresden an einem Strahlungstag.	99
5.9. Einflussfaktoren Fensteröffnung.	100
5.10. Fensteröffnung der äußeren Westfassade der Kinder- und Frauenklinik des Universitätsklinikums Dresden an einem Strahlungstag (28.08.2011)	102
5.11. Fensteröffnung der äußeren Ostfassade der Kinder- und Frauenklinik des Universitätsklinikums Dresden an einem Strahlungstag (28.08.2011)	102
5.12. Geschätzte Anzahl der sich im Raum aufhaltenden Personen im Tagesverlauf. Die Profile wurden aus den Angaben zu Besuchszeiten, Dienstübergabezeiten, Arztvisitezeiten und Mittagsruhezeiten der angegebenen Stationen abgeleitet.	104
5.13. Erstellung einer Kombinationsmatrix aus den Varianten der vermuteten Einflussgrößen des Abhängigkeitsdiagramms	111
5.14. Sensitivitätsanalyse: Vorgehensweise zur Ermittlung der Einflusshierarchien der unbekanntenen Nutzungsprofile	112
5.15. Vorgehensweise zur stufenweisen Ermittlung der am besten mit den Messergebnissen übereinstimmenden Nutzungsprofilvarianten.	113
5.16. Übersicht der untersuchten Varianten für die Sonnenschutzaktivierung. Die Minimalvariante wurde blau, die Maximalvariante rot gekennzeichnet.	115
5.17. Übersicht der untersuchten Varianten für die Fensteröffnung. Die Minimalvariante wurde blau, die Maximalvariante rot gekennzeichnet.	117

5.18. Übersicht der untersuchten Varianten für die Wärmeabgabe durch Personen. Die Minimalvariante wurde blau, die Maximalvariante rot gekennzeichnet.	118
5.19. Übersicht der untersuchten Varianten für die Wärmeabgabe durch Beleuchtung und Geräte. Die Minimalvariante wurde blau, die Maximalvariante rot gekennzeichnet.	119
5.20. Normierte Sensitivitätskoeffizienten gemäß Gleichung 5.4 für die unterschiedlichen Räume und Nutzungsprofiltypen	120
5.21. Ergebnis der Simulationsstudie zur Ermittlung der am besten korrelierenden Profilvarianten für die Fensteröffnung (links) und die Sonnenschutzaktivierung (rechts).	122
5.22. Ergebnis der Simulationsstudie zur Ermittlung der am besten korrelierenden Profilvarianten für die Sonnenschutzaktivierung (links) und die Fensteröffnung (rechts).	124
5.23. Ergebnis der Simulationsstudie zur Ermittlung der am besten korrelierenden Ausstattungswärmelastvariante.	125
5.24. Ergebnis der Simulationsstudie zur Ermittlung der am besten korrelierenden Personenwärmelastvariante.	126
5.25. Diagrammdarstellung der auf den jeweiligen Hierarchieebenen erreichten Korrelation zwischen Messung und Simulation	127
5.26. Darstellung der Raumlufttemperaturkennwerte aus der Messung (links) und der Simulation mit dem kalibrierten Modell	128
6.1. Aufgestellte Bekleidungstypen der Krankenhauspatienten	133
6.2. Hauptanteile (grün) und untergeordnete Anteile (grau) der Wärmebilanz des menschlichen Körpers	150
6.3. Übersicht der Wärmebilanzanteile im Fanger- Modell. Das Ergebnis der Bilanz, L_{Body} , ergibt sich aus der Summe aller aufgeführten Wärmeverluste bzw. -gewinne. Es werden stationäre Verhältnisse angenommen. Daher bleibt die Speicherfähigkeit des Körpers, C_{body} , unbeachtet.	155

Abbildungsverzeichnis

6.4.	Übersicht der Wärmebilanzanteile im Gagge- Modell. Die Ergebnisse der Hüllschicht- (L_{Skin}) und Körperkernbilanz (L_{Core}) ergeben sich aus der Bilanz aller aufgeführten Wärmeverluste bzw. -gewinne. Es werden instationäre Verhältnisse angenommen und daher die Speicherkapazitäten der Hüll- und Kernschicht (C_{Skin}, C_{Core}) in der Bilanz über einen Austauschterm für die Wärmeleitung ($Q_{Ex,Cond}$) und einen Term für den Wärmeaustausch über Blutfluss ($Q_{Ex,Blood}$) berücksichtigt.	158
6.5.	Übersicht der Wärmebilanzanteile im Azer/Hsu- Modell. Die Ergebnisse der Hüllschicht- (L_{Skin}) und Körperkernbilanz (L_{Core}) ergeben sich aus der Bilanz aller aufgeführten Wärmeverluste bzw. -gewinne. Es werden instationäre Verhältnisse angenommen und daher die Speicherkapazitäten der Hüll- und Kernschicht (C_{Skin}, C_{Core}) in der Bilanz über einen Austauschterm (Q_{Ex}) berücksichtigt.	161
6.6.	Übersicht der berücksichtigten Faktoren in den adaptiven Modellen. Für die körperliche Wärmebilanz werden in dem Maße ausgeglichene Verhältnisse angenommen wie der Person Adaptionmöglichkeiten ermöglicht werden.	163
6.7.	Übersicht des beispielhaften Raumklimaverlaufs. Als mittlere relative Luftgeschwindigkeit wurde ein Wert von $1.0 \frac{m}{sec}$ angenommen.	167
6.8.	Übersicht der resultierenden Behaglichkeitsindizes für den beispielhaften Jahresraumklimaverlauf	168
6.9.	Häufigkeit der als behaglich ermittelten Operativtemperaturen für drei ausgewählte Typen im Azer & Hsu- Modell. Es wurden jeweils die Stundenwerte der Operativtemperatur gemittelt, bei denen der Indexwert des Modells zwischen -0.5 und 0.5 lag.	176
7.1.	Übersicht der ersetzten Standardmodelle im Simulationstool Energy Plus, Vers. 7.1.	182
7.2.	Veranschaulichung der Patientenzimmermaße I-, T- und O-Typ für den Fall der minimalen Fensterflächengröße.	186
7.3.	Über die fünf Tage gemittelte Wärmequellen (rote Grafik) sowie Wärmesenken (blaue Grafik) der drei gewählten Raumtypen. Die Anordnung in der Legende entspricht der Anordnung der Segmente im Uhrzeigersinn (erstes Segment ab 0°)	188

7.4.	Über die fünf Tage gemittelter Wärmestrom der inneren Bauteiloberflächen in Richtung Bauteil (Wärmeeintrag, blau) und in Richtung Raumluft (Wärmeabgabe, rot). Die Anordnung in der Legende entspricht der Anordnung der Segmente im Uhrzeigersinn (erstes Segment ab 0°)	189
7.5.	Über die fünf Tage gemittelte Wärmestromdichten der inneren Bauteiloberflächen in Richtung Bauteil. Die Anordnung in der Legende entspricht der Anordnung der Segmente im Uhrzeigersinn (erstes Segment ab 0°)	190
7.6.	Über die fünf Tage gemittelte Wärmeströme der inneren Fensteroberfläche in Richtung Raumluft. Die Anordnung in der Legende entspricht der Anordnung der Segmente im Uhrzeigersinn (erstes Segment ab 0°)	190
7.7.	Tageslichtquotientkarten der Patientenzimmertypen für den bedeckten Himmel mit einer Beleuchtungsstärke im Außenraum von 10.000 Lux(CIE-6). Angegeben sind, stellvertretend für die Kopfposition der Patienten in ihren Betten, zwei Sensorplatzierungen für welche der Tageslichtquotient berechnet wurde.	193
7.8.	Bewertungsindizes für die gewählte fünftägige Sommerphase für das TSV- Modell mit den Eingabedaten für eine ältere bettlägerige und leicht bedeckte Person. Die rote Linie kennzeichnet das Optimum (Indexwert 0). Der rote Bereich kennzeichnet den behaglichen Bereich (Indexwert -0.5 bis +0.5).	195
8.1.	Einordnung der in dieser Arbeit betrachteten Verfahren gemäß ihres potenziellen Einsatzbereiches im entsprechenden Planungsstand, Detaillierungsgrad und baulichen Maßstab. Die untersuchten Verfahren sind schwarz hervorgehoben.	197
8.2.	Lösungsansätze (dunkelblau hervorgehoben) dieser Arbeit zur Verbesserung der Aussagefähigkeit von Simulationsmodellen und folglich für den Transfer der Simulationswerkzeuge in die Planungspraxis . .	198
8.3.	Kalibrierverfahren für die Ermittlung von unbekanntem Nutzungsprofilen.	199
8.4.	Anwendbarkeit der Behaglichkeitsmodelle zur Raumklimabewertung unterschiedlicher Gebäudetypen.	200

Abbildungsverzeichnis

A.1. Ansicht der Wettermessstation Blasewitzer Straße in Dresden auf dem Dach des Medizinisch- Theoretischen Zentrums des Universitätsklinikums Dresden	XXIV
A.2. Standortverteilung der Temperatursensoren der DREWAG im Stadtgebiet von Dresden. Für den Vergleich wurden die Stationen 14 (Blochmannstraße) und 27 (Bautzener Straße) verwendet.	XXV
A.3. Temperaturvergleich für eine Schönwetterphase zwischen dem Testreferenzjahr für den Sommerfall (Messung Potsdam 2006) und den Messwerten der DREWAG im Stadtgebiet: obere Grafik - Ausgangsdatensätze unverändert, mittlere Grafik: mittleres Stadtgebiet, untere Grafik: Stadtzentrum	XXVI
A.4. Vergleich der Klimabedingungen Lufttemperatur, Globalstrahlung und relative Luftfeuchte im Tagesverlauf zwischen Dresden- Klotzsche und Dresden- Johannstadt am Beispiel des Monats Juli 2011	XXVII
A.5. Vergleich der Klimabedingungen absolute Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit im Tagesverlauf zwischen Dresden- Klotzsche und Dresden- Johannstadt am Beispiel des Monats Juli 2011	XXVIII
A.6. Vergleich der Klimabedingungen Diffus- und Direktstrahlung zwischen Dresden- Klotzsche und Dresden- Johannstadt am Beispiel des Monats Juli 2011	XXIX
A.7. Darstellung der linearen Abhängigkeiten der Raumdaten untereinander für die berechneten Räume des Universitätsklinikums Dresden . .	XXXI
A.8. Darstellung der Ergebnisse aller Verfahren als Quotient aus zulässigem und vorhandenem Wert für alle nicht klimatisierten Räume in den Bauten des Universitätsklinikums in der Messphyse I (Juli-Dezember 2010). Werte über einem Verhältnis von 1 (100 %) bedeuten, dass der betreffende Raum vom Verfahren als unzulässig eingestuft wurde. . .	XXXII

A.9. Darstellung der Verfahrensergebnisse und der Messergebnisse als Quotient aus zulässigem und vorhandenem Wert für alle nicht klimatisierten Räume in den Bauten des Universitätsklinikums in der Messphysik I (Juli-Dezember 2010). Die Messwerte wurden ebenfalls als Quotient aus Ist-Wert (gemessener Maximaltemperatur) und Grenzwert (30°C) dargestellt. Werte über einem Verhältnis von 1 (100 %) bedeuten, dass der betreffende Raum nach Messung bzw. nach Bewertung unzulässig ist. Die Abweichungskennzeichnung zwischen Messwert und Kennwert ist orange sofern der Messwert den Kennwert überschreitet und grün sofern der Kennwert oberhalb des Messwertes liegt. XXXIII

A.10. Darstellung der Vorgehensweise zur Durchführung von Simulationsstudien bzw. Gruppensimulationen mit mehreren unterschiedlichen Wetter- und Gebäudedatensätzen für die Simulationssoftware EnergyPlus XXXIV

A.11. Diagrammdarstellung mit den für die Ermittlung der Komfortindizes erstellen Klassen (Klasse|Methoden|Variablen) XXXV

Tabellenverzeichnis

3.1. Vergleich der Rahmenbedingungen für ausgewählte Verfahren zur Vorbemessung des Sommerlichen Wärmeschutzes	58
4.1. Messdatenübersicht klimatisierter und unklimatisierter Räume des Universitätsklinikums Dresden aus der Messphase I (Juli bis Dezember 2010)	67
4.2. Korrelationsfaktoren $\varrho_{B,P}$ nach Bravais & Pearsons für die Eingangskennwerte und die Verfahrensergebnisse (Quotientenausgabe) der verschiedenen Vorbemessungsverfahren. Werte unterhalb eines Betrages von 0.3 sind nicht aufgeführt ([-]).	71
4.3. Übersicht über die Raumbewertung durch die unterschiedlichen Vorbemessungsverfahren	72
5.1. Messdatenübersicht aller Räume des Universitätsklinikums Dresden aus der Messphase II (Juli bis Dezember 2011)	88
5.2. Vergleich der Klimaverhältnisse zwischen Dresden- Klotzsche und Dresden-Johannstadt am Beispiel des Monats Juli 2011.	93
6.1. Wärmedurchlasswiderstand I_{cl} , Bekleidungsflächenfaktor f_{cl} und Verdunstungswiderstand $R_{e,cl}$ von Bekleidungssystemen gemäß ISO EN DIN 9920, Anhang C	132
6.2. Berechnungswerte und resultierende Wärmedurchlasswiderstände I_{cl} von Bettssystemen gemäß [McCullough u. a., 1993, Gleichung 12, S. 1064]	134
6.3. Übersicht über die Einflüsse einiger Medikamente auf das Thermoregulationssystem	139
6.4. Übersicht über die physiologischen und thermoregulatorischen Unterschiede verschiedener Altersgruppen. [KK:Kleinkind, K:Kind, E:Erwachsener, Ä:Älterer]	142

6.5. Ergebnisse praktischer Studien zu Komfortansprüchen in Krankenhäusern	145
6.6. Optimaltemperaturen aus den statischen Modellen für den beispielhaften Raumklimaverlauf und unterschiedliche Isolierkennwerte des Bettsystems. Es wurde $Q_{Met} = 58.0 \frac{W}{m^2}$ (1.0 met) angenommen. . . .	169
6.7. Optimaltemperaturen aus den statischen Modellen für den beispielhaften Raumklimaverlauf für unterschiedliche Grundumsätze. Es wurde $I_{clo} = 0.25 \frac{W}{m^2K}$ angenommen.	171
6.8. Optimaltemperaturen aus den statischen Modellen für den beispielhaften Raumklimaverlauf und unterschiedliche Neutraltemperaturen der Haut und des Körperkerns. Die übrigen Randbedingungen der Berechnung lauten $I_{clo} = 0.25 \frac{W}{m^2K}$ (1.56 clo) und $Q_{Met} = 58.0 \frac{W}{m^2}$ (1.0 met).	172
6.9. Optimaltemperaturen aus den statischen Modellen für drei unterschiedliche Stufen der potenziellen Schweißsekretionsraten. SR ist die durchschnittliche Schweißsekretionsrate. Die übrigen Randbedingungen der Berechnung lauten: $I_{clo} = 0.25 \frac{W}{m^2K}$ (1.56 clo) und $Q_{Met} = 58 \frac{W}{m^2}$ (1.0 met).	173
6.10. Übersicht der aufgestellten Nutzertypen und deren thermoregulatorische Eigenschaften.	174
6.11. Berechnete optimale Operativtemperaturen (Mittelwerte der Operativtemperaturen für Bewertungsindizes zwischen -0.5 und +0.5) der Krankenhaus- Nutzertypen.	175
A.1. Erfasste Wetterelemente der Station Blasewitzer Straße in Dresden .	XXIII
A.2. Bezeichnung, Nutzung und Kennwerte der in der ersten Phase im Jahr 2010 gemessenen Zonen des Universitätsklinikums Dresden (Haus 21 und Haus 58): Ausrichtung w_{Ausr} , Luftvolumen V_{Netto} , Fensterflächenanteil $f_{Fenster}$, Speichermasse $m_{Speicher}$ (30cm- Ansatz) und mittlerer U-Wert der Fassade U_m	XXX
A.3. Bezeichnung, Nutzung und Kennwerte der in der ersten Phase im Jahr 2010 gemessenen Zonen des Universitätsklinikums Dresden (Haus 59): Ausrichtung w_{Ausr} , Luftvolumen V_{Netto} , Fensterflächenanteil $f_{Fenster}$, Speichermasse $m_{Speicher}$ (30cm- Ansatz) und mittlerer U-Wert der Fassade U_m	XXXI

A.4. Bezeichnung, Nutzung und Kennwerte der in der zweiten Phase im Jahr 2011 gemessenen Zonen des Universitätsklinikums Dresden: Ausrichtung w_{Ausr} , Luftvolumen V_{Netto} , Fensterflächenanteil $f_{Fenster}$ und mittlerer U-Wert der Fassade U_m XXXVI

Literaturverzeichnis

- [A. P. Gagge 1986] A. P. GAGGE, A. B. L. G. Fobelets F. L. G. Fobelets: Standard predictive Index of human response to the thermal environment. In: *Ashrae Transactions* 92 (1986), S. 702–731
- [ASR A3.5 2010] ASR A3.5: *Technische Regeln für Arbeitsstätten - Raumklima*. 6 2010
- [AStV 2004] AStV 2004: *Verordnung über Arbeitsstätten (Arbeitsstättenverordnung) einschließlich Technische Regeln für Arbeitsstätten*
- [Azer u. Hsu 1977] AZER, N. Z. ; HSU, S.: The prediction of thermal sensation from simple model of human physiological regulatory response. In: *Ashrae Transactions* 83 (1977), S. 88–102
- [Basu u. Samet 2002] BASU, R. ; SAMET, J. M.: Relation between elevated ambient temperature and mortality: a review of the epidemiologic evidence. In: *Epidemiologic Reviews* 24 (2002), November, Nr. 190-202, S. 3–33
- [Belding u. Hatch 1955] BELDING, H. S. ; HATCH, T. F.: Index for evaluation heat stress in terms of resulting physiological strains. In: *ASHRAE Transactions* 1 (1955), Nr. 62, S. 213
- [Bernhofer u. Goldberg 2008] BERNHOFER, C. ; GOLDBERG, V.: *Sachsen im Klimawandel - Eine Analyse*. 1. Druckerei Thieme und Co Kg Meissen, 2008
- [Broto 2009] BROTO, C.: *New health facilities*. Links International, 2009
- [Clark u. Edholm 1985] CLARK, R. P. ; EDHOLM, O. G.: *Man and his thermal environment*. Edward Arnold London, 1985
- [deDear u. a. 1997] DEDEAR, R. ; BRAGER, G. ; COOPER, D.: Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. In: *ASHRAE Report* 884 (1997), S. 1–297

Literaturverzeichnis

- [deDear u. Brager 2001] DEDEAR, R. ; BRAGER, G. S.: The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment. In: *International Journal of Biometeorology* 45 (2001), S. 100–108
- [DIN 13080 2003] DIN 13080: *Gliederung des Krankenhauses in Funktionsbereiche und Funktionsstellen*. 7 2003
- [DIN 4108-2 2003] DIN 4108-2: *Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen den Wärmeschutz*. 2003
- [DIN 4108-2 2013] DIN 4108-2: *Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen den Wärmeschutz*. 2013
- [DIN 4109-1 2008] DIN 4109-1: *Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Anforderungen*. 2008
- [DIN EN 15251 2012] DIN EN 15251: *Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden- Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik*. 12 2012
- [DIN EN ISO 7730 2006] 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*. 5 2006
- [DIN EN ISO 9920 2009] DIN EN ISO 9920: *Ergonomie der thermischen Umgebung - Abschätzung der Wärmeisolation und des Verdunstungswiderstandes einer Bekleidungskombination*. Oktober 2009
- [EPlus IORef 2012] EPLUS IOREF: Energy Plus - Input Output Reference, The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output / Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). 2012. – Forschungsbericht
- [Fanger 1967] FANGER, P. O.: Calculation of thermal comfort: introduction of a thermal comfort equation. In: *ASHRAE Transactions* 73(II) (1967), Nr. 73, S. III.4.1–III.4.19
- [Fanger 1970] FANGER, P. O.: *Thermal comfort - analysis and applications in environmental engineering*. 1. Danish Technical Press, Copenhagen, 1970

- [Foster u. a. 1976] FOSTER, K. G. ; ELLIS, F. P. ; DORE, C. ; EXTON-SMITH, A. N. ; WEINER, J. S.: Sweat responses in the aged. In: *Age and Ageing Research Reviews* 5 (1976), S. 91–101
- [Fouillet u. a. 2006] FOUILLET, A. ; REY, G. ; LAURENT, F. ; PAVILLON, G. ; BELLEC, S. ; GUIHENNEUC-JOUYAU, C.: Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France. In: *Int Arch Occup Environ Health* 80 (2006), S. 16–24
- [Gagge u. a. 1971] GAGGE, A. P. ; STOLWIJK, J. A. J. ; NISHI, Y.: An effective Temperature Scale based on a simple Model of human physiological regulatory Response. In: *Ashrae Transactions* 77 (1971), S. 246–262
- [Gagge u. a. 1978] GAGGE, A. P. ; STOLWIJK, J. A. J. ; NISHI, Y.: An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. In: *Ashrae Transactions* 77 (1978), Nr. 2192, S. 247–262
- [Häupl 1996] HÄUPL, P.: Ein einfaches Nachweisverfahren für den Sommerlichen Wärmeschutz. In: *Zeitschrift für Wärme-, Kälte-, Schall- und Brandschutz (wksb)* 37 (1996), S. 12–15
- [Häupl 2008] HÄUPL, P.: *Bauphysik - Klima Wärme Feuchte Schall, Grundlagen, Anwendungen, Beispiele*. Ernst und Sohn GmbH und Co, Berlin, 2008
- [Hauser 2000] HAUSER, G.: Die Wirkung der Wärmespeicherfähigkeit von Bauteilen und ihre Berücksichtigung in der EnEV. In: *Bauphysik* 22 (2000), S. 308–312
- [Hauser u. Gertis 1980] HAUSER, G. ; GERTIS, K.: Der sommerliche Wärmeschutz von Gebäuden (Normungsvorschlag) / Universität Essen. 1980 (6). – Forschungsbericht
- [Hauser u. Otto 2000] HAUSER, G. ; OTTO, F.: Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit auf Heizwärmebedarf und sommerliches Wärmeverhalten. In: *Deutsche Bauzeitung (DB)* 4 (2000), S. 113–118
- [Havenith 2001] HAVENITH, G.: Temperature regulation and technology. In: *Geron-technology* 1 (2001), S. 41–49
- [Haycock u. a. 1978] HAYCOCK, G. B. ; CHIR, B. ; SCHWARTZ, G. J. ; WISOTSKY, D. H.: Geometric method for measuring body surface area: a height- weight formula validated in infants, children and adults. In: *The Journal of Pediatrics* 93 (1978), Nr. 1, S. 62–66

Literaturverzeichnis

- [Hoffmann u. a. 2008] HOFFMANN, B. ; HERTEL, S. ; BOES, T. ; WEILAND, D. ; JÖCKEL, K. H.: Increased cause- specific mortality associated with 2003 Heat Wave in Essen, Germany. In: *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A* 71 (2008), S. 759–765
- [von Humboldt 1832] HUMBOLDT, Alexander von: *Fragmente einer Geologie und Klimatologie Asiens*. 1. J.A. List, Berlin, 1832. – 182–183 S.
- [Humphreys u. Nicol 1995] HUMPHREYS, M. A. ; NICOL, J. F.: An adaptive guideline for UK office temperatures. In: *Standards for Thermal Comfort - Indoor air temperature standards for the 21st century*, F. Nicol and M. Humphreys and O. Sykes and S. Roaf, 1995, S. 190–205
- [Hwang u. a. 2007] HWANG, R.-L. ; LIN, T.-P. ; CHENG, M.-J. ; CHIEN, J.-H.: Patient thermal comfort requirement for hospital environments in Taiwan. In: *Building and Environment* 42 (2007), S. 2980–2987
- [ISO/TS 14415 2005] ISO/TS 14415: *Ergonomie der thermischen Umgebung - Anwendung Internationaler Normen auf Personen mit besonderen Anforderungen*. 2005
- [KHG Sachsen 2009] KHG SACHSEN: *Sächsisches Krankenhausregister*. <http://www.krankenhausregister-sachsen.de>, Juni 2009
- [Khodakarami u. Knight 2008] KHODAKARAMI, J. ; KNIGHT, I.: Required and current thermal conditions for occupants in iranian hospitals. In: *HVAC and Research* 14 (2008), S. 175–193
- [KhRl 2003 2003] KHRL 2003: *Richtlinie für Krankenhaushygiene und Infektionsprävention*. 2003
- [Kolmetz 1996] KOLMETZ, S.: *Thermische Bewertung von Gebäuden unter sommerlichen Randbedingungen*, Universität Gesamthochschule Kassel, Fachbereich Architektur, Diss., 1996
- [Koppe 2005] KOPPE, Christina: *Gesundheitsrelevante Bewertung von thermischer Belastung unter Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung der Bevölkerung an die lokalen Witterungsverhältnisse*, Albert- Ludwigs- Universität Freiburg im Breisgau, Diss., Mai 2005

- [Küchler u. Sommer 2005] KÜCHLER, W. ; SOMMER, W.: *Klimawandel in Sachsen - Sachstand und Ausblick*. 1. SachsoPrint GmbH, 2005
- [Lee u. a. 2000] LEE, J. ; STRAND, R. ; MALONEY, D.: *Thermal Comfort Models implemented in EnergyPlus (Fortran Source Code)*. Jan 2000
- [Liese 1970] LIESE, Walther: Behaglichkeit - Hygienische Bedeutung und Klimatechnisches Normativ. In: *Gesundheitsingenieur* 1 (1970), Nr. 4, S. 4–44
- [McArdle u. a. 1947] MCARDLE, B. ; DUNHAM, W. ; HOLLING, H. E. ; LADELL, W. S. S. ; SCOTT, J. W. ; THOMSON, M. L. ; WEINER, J. S.: The prediction of the physiological effects of warm and hot environments / Medical Research Council London. 1947 (391). – Forschungsbericht
- [McCartney u. Nicol 2002] MCCARTNEY, K. J. ; NICOL, J. F.: Developing an adaptive control algorithm for Europe. In: *Energy and Buildings* 34 (2002), S. 623–635
- [McCullough u. a. 1993] MCCULLOUGH, E. A. ; ZBIKOWSKI, P. J. ; JONES, B. W.: Measurement and prediction of the insulation provided by bedding systems. In: *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE) Journal* 1 (1993), S. 1055–1068
- [McMichael u. a. 2004] MCMICHAEL, Anthony J. ; CAMPBELL-LENDRUM, Diarmid ; KOVATS, Sari ; EZZATI, Majid (Hrsg.) ; LOPEZ, Alan D. (Hrsg.) ; RODGERS, Anthony (Hrsg.) ; MURRAY, Christopher J. (Hrsg.): *Comparative quantification of health risks - global and regional burden of disease attributable to selected major risk factors*. Bd. 1. World Health Organization Geneva, 2004. – 1543–1649 S.
- [Naughton u. a. 2002] NAUGHTON, M. P. ; HENDERSON, A. ; MIRABELLI, M. ; KAISER, R.: Heat-related mortality during a 1999 heat wave in Chicago. In: *American Journal of Preventive Medicine* 22 (2002), S. 221–227
- [Neufert u. Neufert 2012] NEUFERT, E. ; NEUFERT, P.: *Architect's Data*. 4. Auflage. Blackwell Publishing Chichester (UK), 2012
- [Nickl-Weller 2007] NICKL-WELLER, C.: *Krankenhausarchitektur für die Zukunft*. Verlagshaus Braun, 2007
- [Nicol u. Humphreys 2002] NICOL, J. F. ; HUMPHREYS, M. A.: Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. In: *Energy and Buildings* 34 (2002), S. 563–572

Literaturverzeichnis

- [Otto u. Hauser 1998] OTTO, F. ; HAUSER, G. ; RAUMORDNUNG, Bonn Bundesamt f. Bauwesen und Städtebau S. Bauwesen und Städtebau (Hrsg.): *Planungsinstrument für das sommerliche Wärmeverhalten von Gebäuden*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 1998 (F 2340/1)
- [Parsons 2003] PARSONS, K. C. ; 2 (Hrsg.): *Human thermal environments - the effects of hot, moderate and cold environments on human health, comfort and performance*. Taylor and Francis, London, 2003. – 1–527 S. – ISBN: 0-415-23792-0
- [Parsons u. Webb 1999] PARSONS, K. C. ; WEBB, L. H.: Thermal comfort design conditions for indoor environments occupied by people with physical disabilities - Final report to EPSRC research grant GR/K71295 / Loughborough University UK. 1999. – Forschungsbericht
- [Petzold 1983] PETZOLD, K. ; HEINRICH, G. (Hrsg.): *Raumlufttemperatur*. 2. VEB Verlag Technik Berlin, 1983 (Reihe Luft- und Kältetechnik)
- [Potter u. a. 2007] POTTER, Michelle ; ROTH, Kristin ; NEIDING, Jennifer ; REED, Sara ; PIZAR, Chuck: *Verification, validation and testing in software engineering*. Idea Group Publishing Hershey & London, 2007
- [Rauh 2001] RAUH, W. D.: Architektur - ein Heilfaktor? In: *Deutsche Bauzeitschrift (DBZ)* 2 (2001), S. 110–113
- [Reddy 2005] REDDY, T. A.: Literature review on calibration of building energy simulation programs: uses, problems, procedures, uncertainty and tools. In: *ASHRAE Transactions* 112 - Part 1 (2005), S. 226–240
- [Robertshaw 1981] ROBERTSHAW, D. ; K. CENA, J. A. C. (Hrsg.): *Studies in Environmental Science*. Bd. 10: *Bioengineering, thermal physiology and comfort - man in extreme environments, problems of the newborn and elderly*. Elsevier Amsterdam, Oxford, New York, 1981. – 169–179 S.
- [Robinson u. a. 1945] ROBINSON, S. ; TURRELL, E. S. ; GERKING, S. D.: Physiologically equivalent conditions of air temperature and humidity. In: *American Journal of Physiology* 1 (1945), Nr. 143, S. 21
- [Rouvel u. a. 2001] ROUVEL, L. ; DEUTSCHER, P. ; ELSBERGER, M. ; ROUVEL, L. (Hrsg.): *Vereinfachte Berechnungsverfahren für den sommerlichen Wärmeschutz sowie Einsatzbedingungen von RLT- Anlagen*. Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart,

- 2001 (Energieeinsparverordnung: Untersuchung differenzierter Ansätze zur energetischen Bewertung von Gebäuden mit Anlagen zur Raumluftkonditionierung)
- [Rouvel u. Kolmetz 1997] ROUVEL, L. ; KOLMETZ, S.: Thermische Bewertung von Gebäuden unter sommerlichen Randbedingungen. In: *Gesundheitsingenieur - Haustechnik, Bauphysik, Umwelttechnik* 118 (1997), S. 65–74
- [SächsKhPfBauR 2007] SÄCHSKHPFBaur: *Richtlinie des Sächsischen Staatsministeriums des Inneren über den Bau und Betrieb von Krankenhäusern und Pflegeheimen*. 2007
- [Schmiege u. Maderer 2001] SCHMIEGE, P. ; MADERER, M.: Das nutzerorientierte Patientenzimmer. In: *Deutsche Bauzeitschrift (DBZ)* 2 (2001), S. 104–108
- [Schönwiese 2006] SCHÖNWIESE, Christian D. ; SCHÖNWIESE, Christian D. (Hrsg.): *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*. 4. Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung Berlin, Stuttgart., 2006
- [Schricker 2001] SCHRICKER, R.: Grundlagen der Gestaltung von medizinisch-therapeutischen Räumen. In: *Deutsche Bauzeitschrift (DBZ)* 2 (2001), S. 94–98
- [Simulation Research Group 2011] SIMULATION RESEARCH GROUP, Michael W.: *GenOpt - Generic optimization program: user manual*. Version 3.1.0. Building Technologies Department, Environmental Energy Technology Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, December 2011
- [Skoog u. a. 2005] SKOOG, J. ; FRANSSON, N. ; JAGEMAR, L.: Thermal environment in Swedish hospitals - summer and winter measurements. In: *Energy and Buildings* 37 (2005), S. 872–877
- [Smith u. Rae 1977] SMITH, R. M. ; RAE, A.: Thermal comfort of patients in hospital ward areas. In: *Journal of Hygiene* 78 (1977), S. 17–26
- [StaBA 2011 2011a] STABA 2011 ; WIESBADEN, Statistisches B. (Hrsg.): *Gesundheit - Grunddaten der Krankenhäuser*. DeStatis, 2011
- [StaBA 2011 2011b] STABA 2011 ; WIESBADEN, Statistisches B. (Hrsg.): *Gesundheit - Kostennachweis der Krankenhäuser*. DeStatis, 2011
- [Sun u. Reddy 2006] SUN, Jian ; REDDY, T. A.: Calibration of building energy simulation programs using the analytic optimization approach (RP- 1051). In: *HVAC and Research* 12 (2006), S. 177–196

Literaturverzeichnis

- [Tahmasebi u. Mahdavi 2012] TAHMASEBI, Farhang ; MAHDAVI, Ardeshir: Monitoring- based optimization- assisted calibration of the thermal performance model of an office building. In: *EPOKA University, 1st International Conference on Architecture and Urban Design, Proceedings 1* (2012), S. 1111–1116
- [TGL 35424-4 1981] TGL 35424-4: *Bautechnischer Wärmeschutz - Wärmeschutz in der warmen Jahreszeit. 2* 1981
- [Tsuzuki-Hayakawa u. a. 1995] TSUZUKI-HAYAKAWA, K. ; TOCHIHARA, Y. ; OHNAKA, T.: Thermoregulation during heat exposure of young children compared to their mothers. In: *European Journal of applied Physiology* 72 (1995), S. 12–17
- [vanHoof u. Hensen 2006] VANHOOF, J. ; HENSEN, J. L. M.: Thermal comfort and older adults. In: *Gerontechnology* 4 (2006), S. 223–228
- [Verheyen u. a. 2011] VERHEYEN, J. ; THEYS, N. ; ALLONSIUS, L. ; DAESCAMPS, F.: Thermal comfort of patients: objective and subjective measurements in patients rooms of a Belgian healthcare facility. In: *Building and Environment* 46 (2011), S. 1195–1204
- [Wagner u. a. 1974] WAGNER, J. A. ; ROBINSON, S. ; MARINO, R.P.: Age and temperature regulation of humans in neutral and cold environments. In: *Journal of applied Physiology* 37 (1974), Nr. 4, S. 562–565
- [Wetter 2013] WETTER, Michael: EnergyPlus - Engineering Reference / University of Illinois and University of California through Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. 2013. – Forschungsbericht
- [Wetterdienst 2011] WETTERDIENST, DWD D.: Handbuch zu den neuen Testreferenzjahren 2011 (TRY) / DWD (Deutscher Wetterdienst) im Auftrag des BMVBS (Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung). 2011. – Forschungsbericht
- [Yau u. Chew 2009] YAU, Y. H. ; CHEW, B. T.: Thermal comfort study of hospital workers in Malaysia. In: *Indoor Air* 19 (2009), S. 500–510

A. Anhang

A.1. Beschreibung der Außenklimamessstation Dresden-Johannstadt

Wetterelement	Sensor	Messbereich	Einheit	Genauigkeit
Globalstrahlung	SP FLA 628	310-2800 nm	<i>W</i>	+ - 3%
Diffusstrahlung	SP FLA 628 SR ZB 9628	310-2800 nm	<i>W</i>	+ - 3%
Infrarotstrahlung	PM CGR 3	4-42 μm	<i>W</i>	+ - 5%
Lufttemperatur	FMA 510 T	-52-60 $^{\circ}C$	$^{\circ}C$	+ - 0.3 $^{\circ}C$
Relative Luftfeuchte	FMA 510 rLF	0-100 %	%	+ - 3.0 %
Windgeschwindigkeit	FMA 510 WG	0.5-60.0 $\frac{m}{sec}$	$\frac{m}{sec}$	+ - 5 %
Windrichtung	FMA 510 WR	0-360 $^{\circ}$	$^{\circ}$	+ - 3.0 %
Niederschlag	FMA 510 N	0-200 <i>mm</i>	<i>mm</i>	+ - 5.0 %
Luftdruck	FMA 510 P	600-1100 <i>mbar</i>	<i>mbar</i>	+ - 1.0 <i>mbar</i>

Tabelle A.1.: Erfasste Wetterelemente der Station Blasewitzer Straße in Dresden

A. Anhang

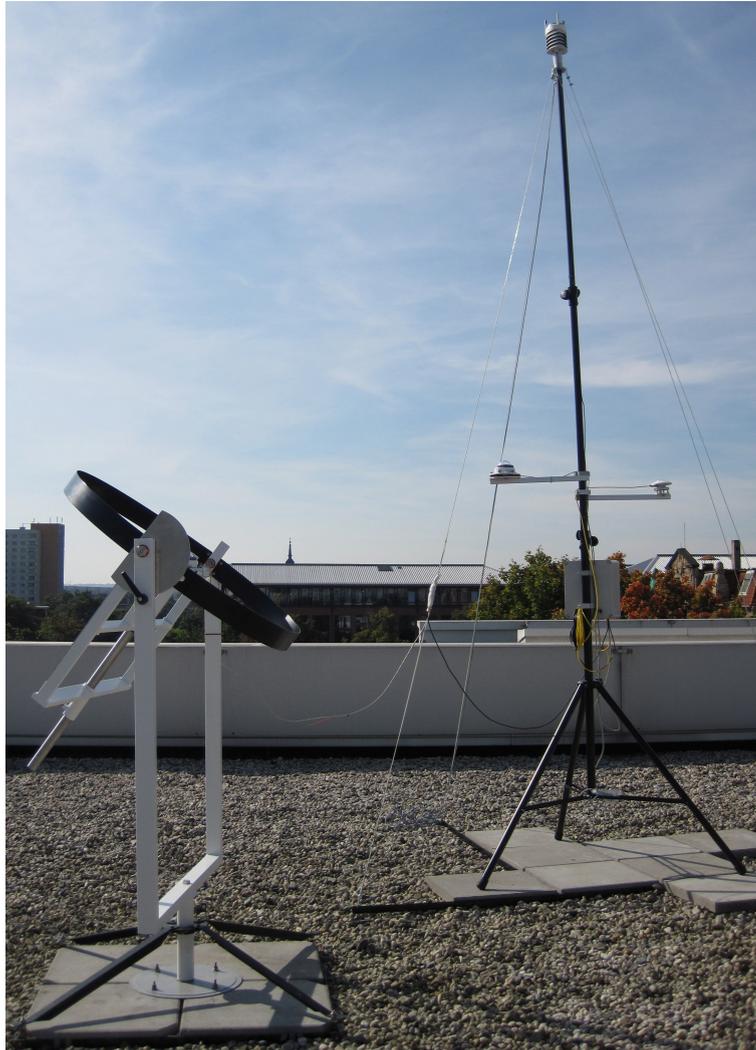


Abbildung A.1.: Ansicht der Wettermessstation Blasewitzer Straße in Dresden auf dem Dach des Medizinisch- Theoretischen Zentrums des Universitätsklinikums Dresden

A.2. Auswertung Stadtklimamessungen der DREWAG

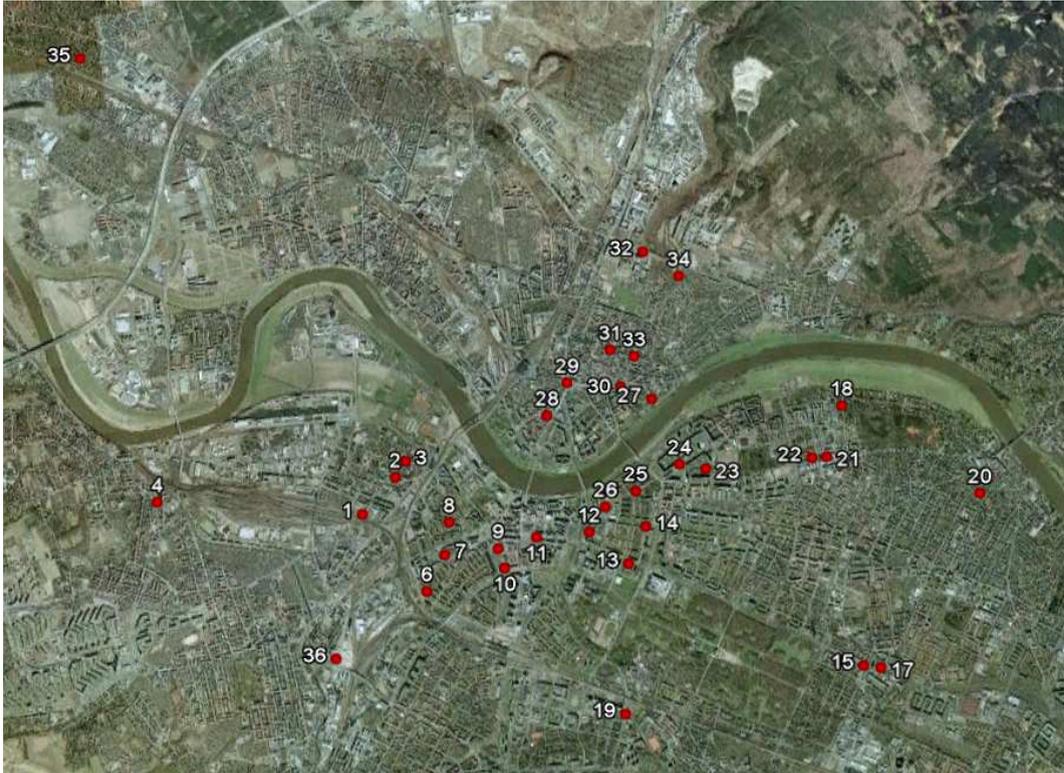


Abbildung A.2.: Standortverteilung der Temperatursensoren der DREWAG im Stadtgebiet von Dresden. Für den Vergleich wurden die Stationen 14 (Blochmannstraße) und 27 (Bautzener Straße) verwendet.

A. Anhang

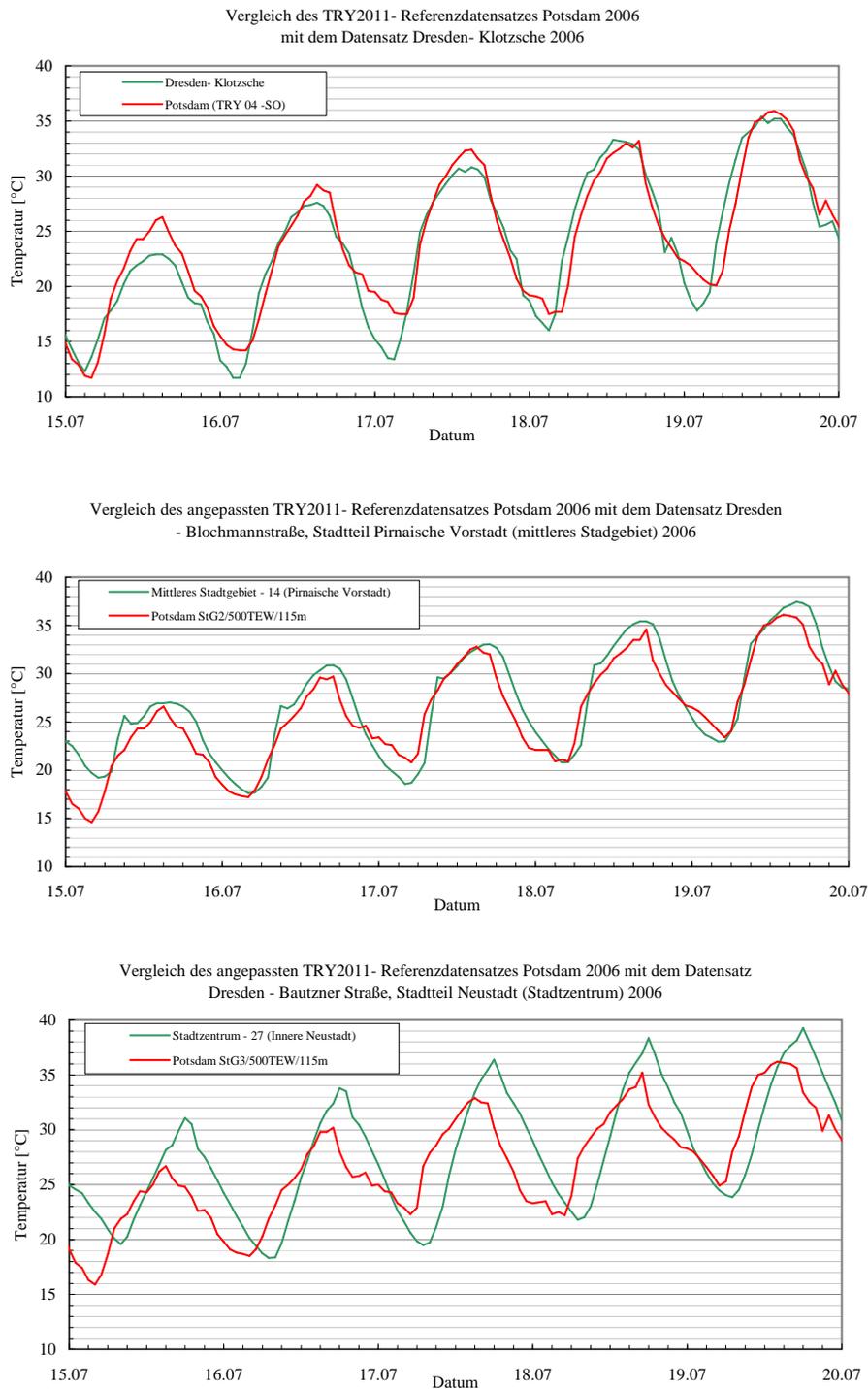


Abbildung A.3.: Temperaturvergleich für eine Schönwetterphase zwischen dem Testreferenzjahr für den Sommerfall (Messung Potsdam 2006) und den Messwerten der DREWAG im Stadtgebiet: obere Grafik - Ausgangsdatsätze unverändert, mittlere Grafik: mittleres Stadtgebiet, untere Grafik: Stadtzentrum

A.2. Auswertung Stadtklimamessungen der DREWAG

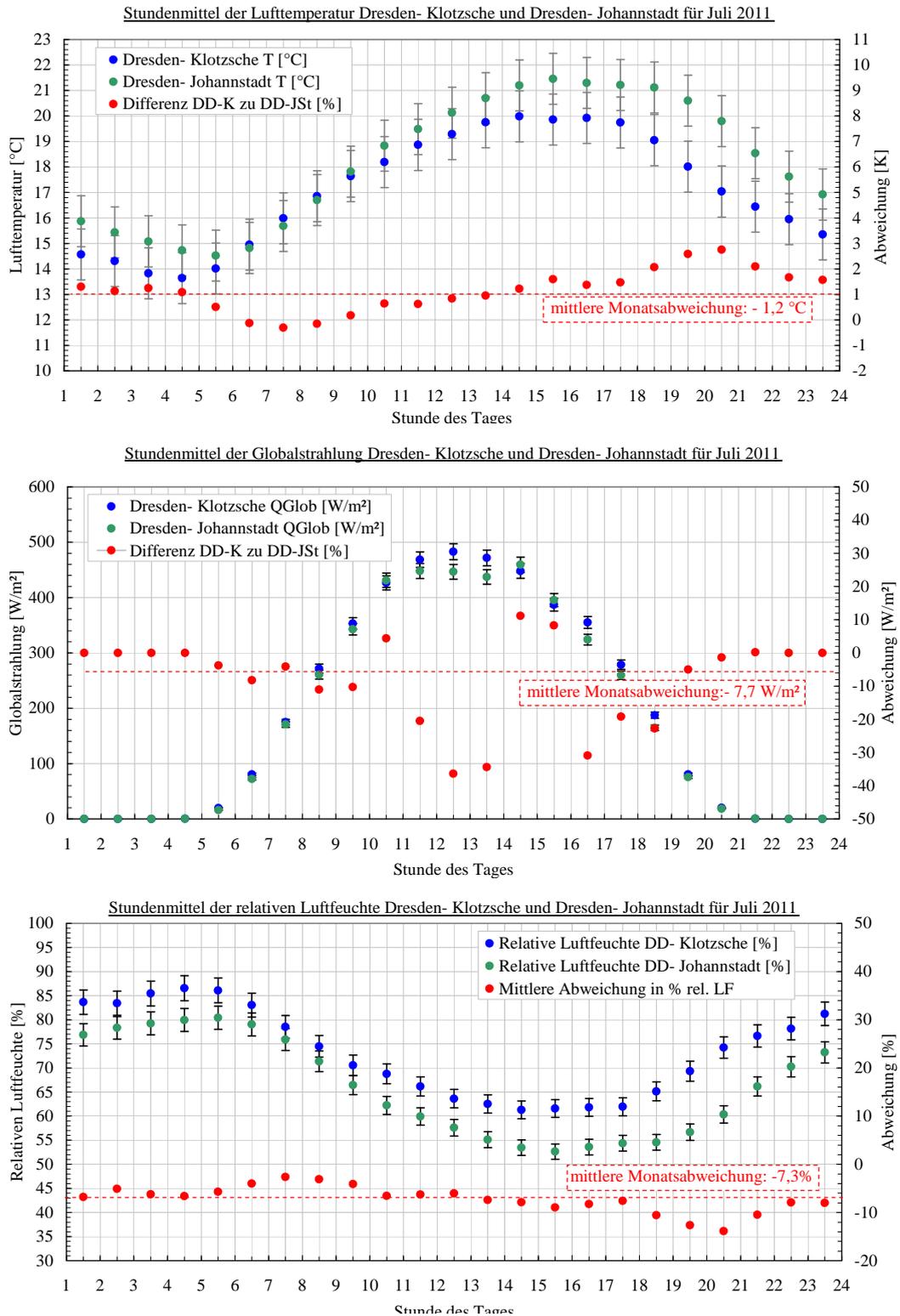


Abbildung A.4.: Vergleich der Klimabedingungen Lufttemperatur, Globalstrahlung und relative Luftfeuchte im Tagesverlauf zwischen Dresden- Klotzsche und Dresden- Johannstadt am Beispiel des Monats Juli 2011

A. Anhang

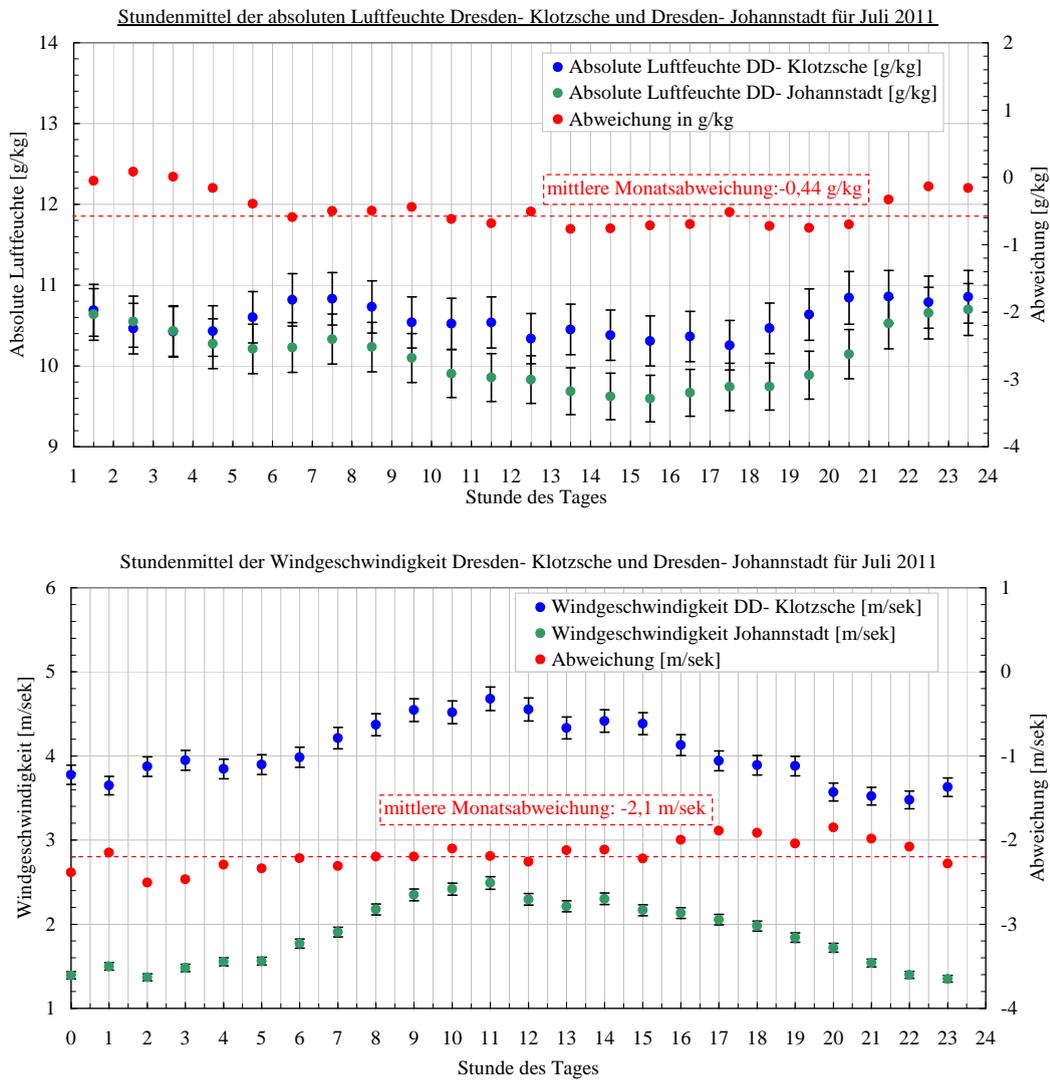


Abbildung A.5.: Vergleich der Klimabedingungen absolute Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit im Tagesverlauf zwischen Dresden- Klotzsche und Dresden- Johannstadt am Beispiel des Monats Juli 2011

A.2. Auswertung Stadtklimamessungen der DREWAG

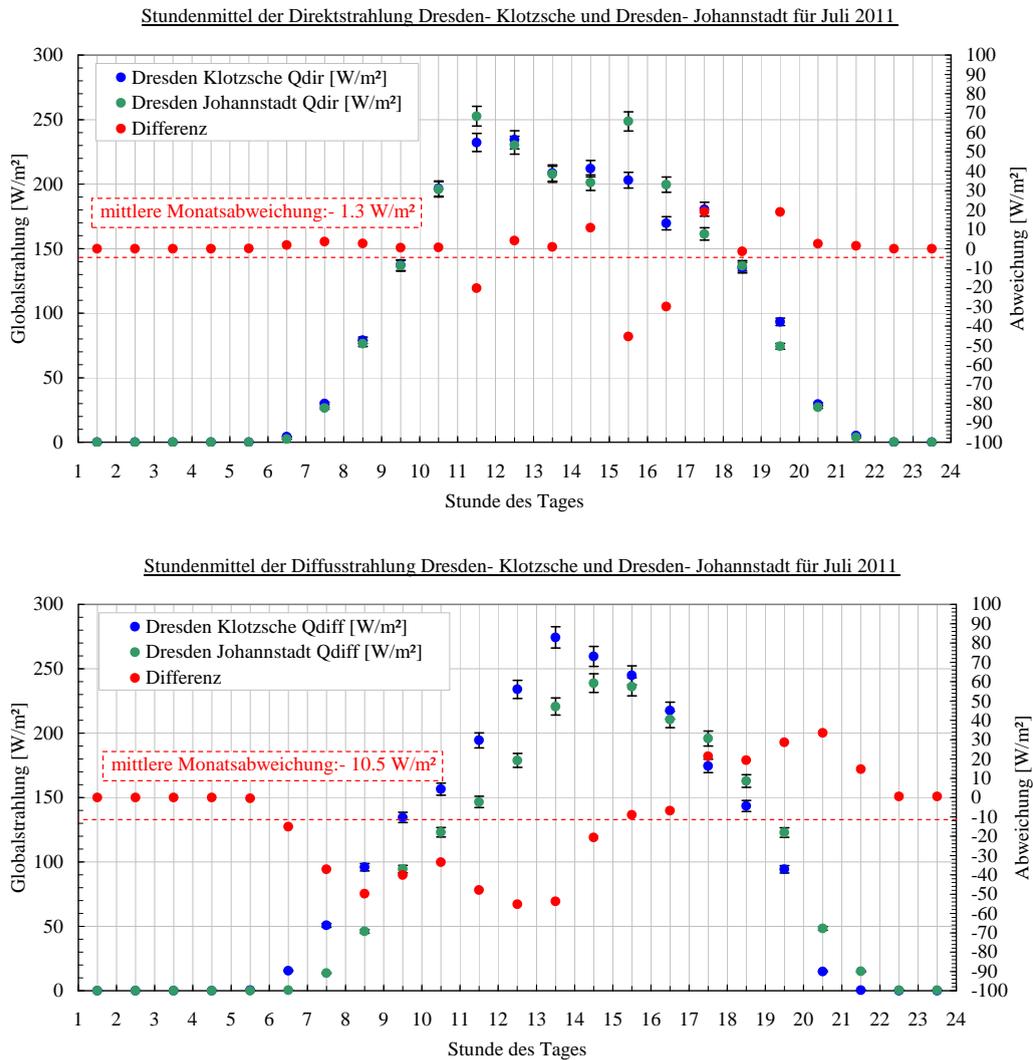


Abbildung A.6.: Vergleich der Klimabedingungen Diffus- und Direktstrahlung zwischen Dresden- Klotzsche und Dresden- Johannstadt am Beispiel des Monats Juli 2011

A.3. Raumübersicht (Kennwerte) und Verfahrensvergleich der Messphase I (2010)

Tabelle A.2.: Bezeichnung, Nutzung und Kennwerte der in der ersten Phase im Jahr 2010 gemessenen Zonen des Universitätsklinikums Dresden (Haus 21 und Haus 58): Ausrichtung w_{Ausr} , Luftvolumen V_{Netto} , Fensterflächenanteil $f_{Fenster}$, Speichermasse $m_{Speicher}$ (30cm- Ansatz) und mittlerer U-Wert der Fassade U_m

Gebäudekennung, Nutzung	w_{Ausr}	V_{Netto}	$f_{Fenster}$	$m_{Speicher}$	U_m
21.0.118 Sekretariat	O, W	45,8m ³	92,6%	810,1 $\frac{kg}{m^2}$	1,5 $\frac{W}{m^2K}$
21.0.234 Patientenzimmer	O, W	76,4m ³	65,6%	895,1 $\frac{kg}{m^2}$	1,1 $\frac{W}{m^2K}$
21.1.116 Patientenzimmer	O, W	42,6m ³	70,6%	867,8 $\frac{kg}{m^2}$	1,2 $\frac{W}{m^2K}$
21.1.229 Patientenzimmer	O, W	72,3m ³	63,0%	888,7 $\frac{kg}{m^2}$	1,1 $\frac{W}{m^2K}$
21.2.230 Patientenzimmer	O, W	73,1m ³	83,9%	824,2 $\frac{kg}{m^2}$	1,4 $\frac{W}{m^2K}$
21.3.120 Patientenzimmer	O, W	62,5m ³	84,1%	830,3 $\frac{kg}{m^2}$	1,4 $\frac{W}{m^2K}$
21.3.125 Patientenzimmer	O, W	64,8m ³	84,0%	858,0 $\frac{kg}{m^2}$	1,4 $\frac{W}{m^2K}$
21.4.120 Patientenzimmer	O, W	62,6m ³	83,1%	831,7 $\frac{kg}{m^2}$	1,4 $\frac{W}{m^2K}$
58.E.48 Schwesternzimmer	S	53,3m ³	53,3%	897,6 $\frac{kg}{m^2}$	0,7 $\frac{W}{m^2K}$
58.1.28 Aufenthaltsraum	S	160,1m ³	82,9%	829,3 $\frac{kg}{m^2}$	1,0 $\frac{W}{m^2K}$
58.1.46 Aufwachraum	O, W	214,4m ³	41,6%	861,6 $\frac{kg}{m^2}$	0,6 $\frac{W}{m^2K}$
58.2.04 Untersuchungsraum	N	86,7m ³	29,2%	1009,9 $\frac{kg}{m^2}$	0,5 $\frac{W}{m^2K}$
58.2.28 Aufenthaltsraum	S	159,2m ³	88,4%	809,9 $\frac{kg}{m^2}$	1,1 $\frac{W}{m^2K}$
58.2.46 Aufwachraum	O, W	214,6m ³	46,4%	853,3 $\frac{kg}{m^2}$	0,6 $\frac{W}{m^2K}$

A.3. Raumübersicht (Kennwerte) und Verfahrensvergleich der Messphase I (2010)

Tabelle A.3.: Bezeichnung, Nutzung und Kennwerte der in der ersten Phase im Jahr 2010 gemessenen Zonen des Universitätsklinikums Dresden (Haus 59): Ausrichtung w_{Ausr} , Luftvolumen V_{Netto} , Fensterflächenanteil $f_{Fenster}$, Speichermasse $m_{Speicher}$ (30cm- Ansatz) und mittlerer U-Wert der Fassade U_m

Gebäudekennung, Nutzung	w_{Ausr}	V_{Netto}	$f_{Fenster}$	$m_{Speicher}$	U_m
59.0.224 Sekretariat	O, W	55,7m ³	60,0%	899,9 $\frac{kg}{m^2}$	0,9 $\frac{W}{m^2K}$
59.0.338 Sekretariat	N	34,1m ³	60,0%	890,3 $\frac{kg}{m^2}$	0,9 $\frac{W}{m^2K}$
59.0.444 Arztzimmer	N	51,7m ³	54,0%	923,7 $\frac{kg}{m^2}$	0,9 $\frac{W}{m^2K}$
59.1.503a Bibliothek	S	169,3m ³	41,4%	966,8 $\frac{kg}{m^2}$	0,8 $\frac{W}{m^2K}$
59.2.132 Sekretariat	S	41,5m ³	72,3%	842,0 $\frac{kg}{m^2}$	1,0 $\frac{W}{m^2K}$
59.2.236 Dienstraum	O, W	22,4m ³	61,6%	964,1 $\frac{kg}{m^2}$	0,9 $\frac{W}{m^2K}$
59.3.125 Untersuchungsraum	N	52,3m ³	79,6%	844,0 $\frac{kg}{m^2}$	1,1 $\frac{W}{m^2K}$
59.3.235 Aufenthaltsraum	O, W	31,5m ³	66,2%	879,2 $\frac{kg}{m^2}$	1,0 $\frac{W}{m^2K}$
59.4.217 Arztzimmer	O, W	37,0m ³	51,9%	909,3 $\frac{kg}{m^2}$	0,9 $\frac{W}{m^2K}$
59.4.433 Arztzimmer	O, W	32,7m ³	61,5%	890,8 $\frac{kg}{m^2}$	0,9 $\frac{W}{m^2K}$

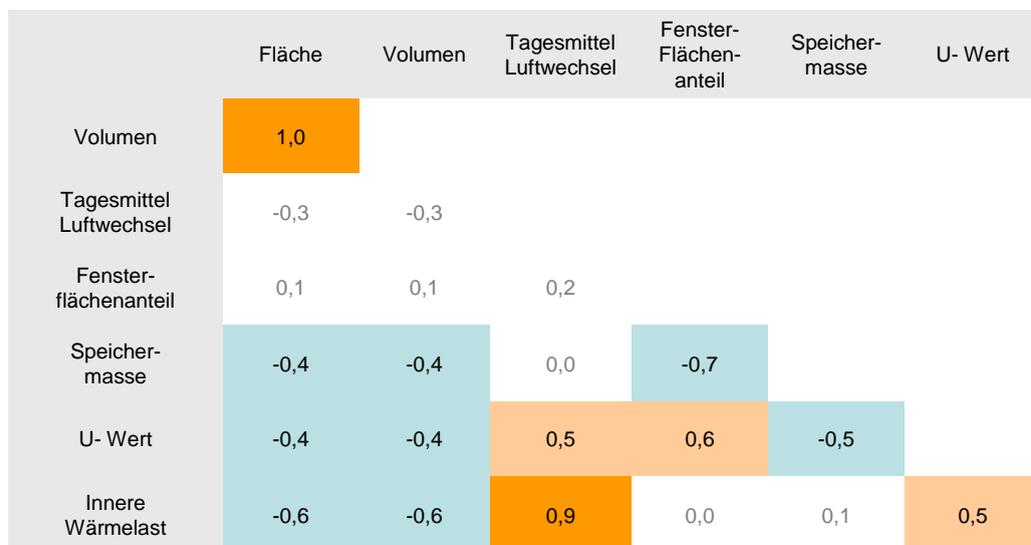


Abbildung A.7.: Darstellung der linearen Abhängigkeiten der Raumdaten untereinander für die berechneten Räume des Universitätsklinikums Dresden

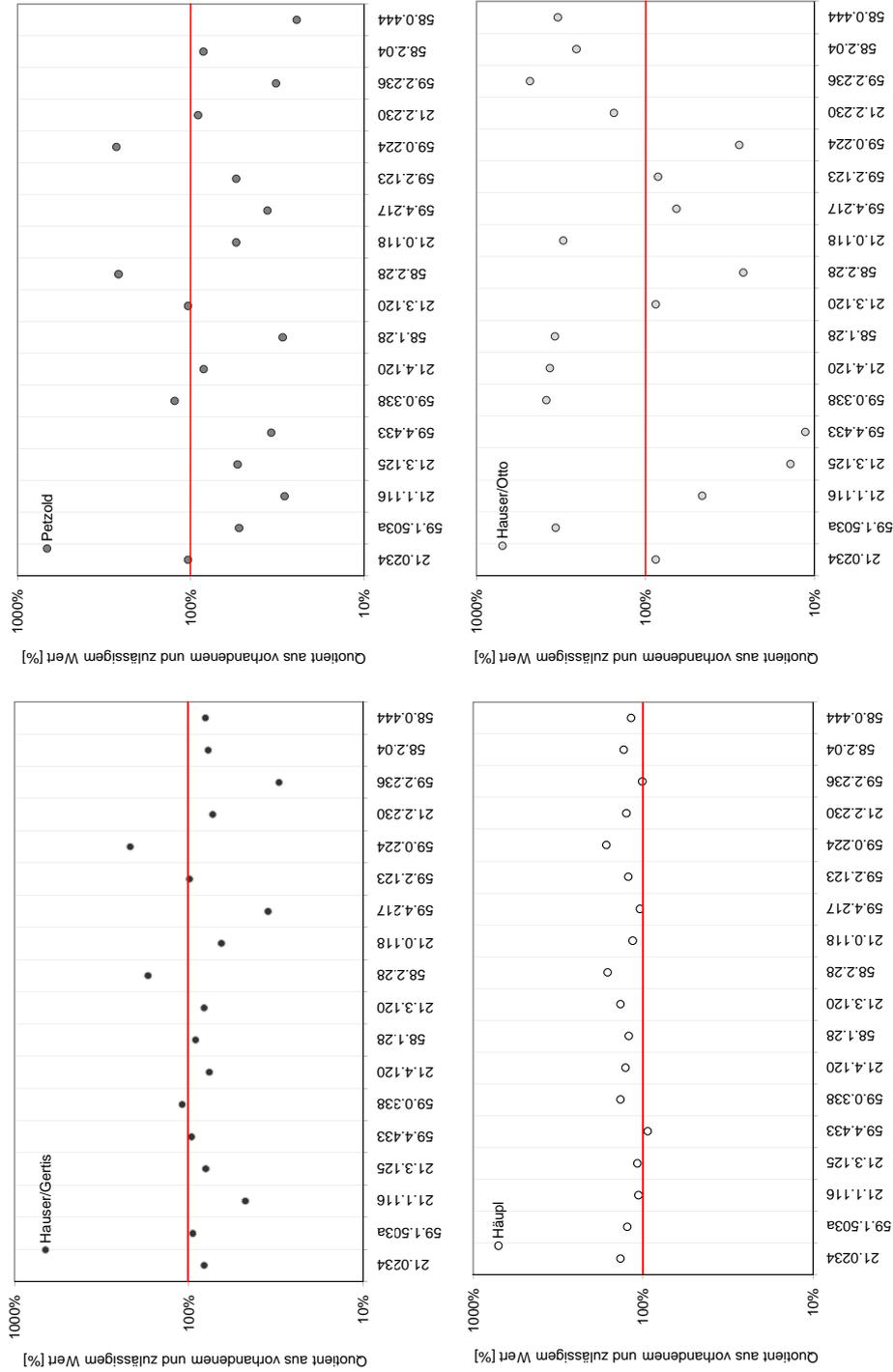


Abbildung A.8.: Darstellung der Ergebnisse aller Verfahren als Quotient aus zulässigem und vorhandenem Wert für alle nicht klimatisierten Räume in den Bauten des Universitätsklinikums in der Messphase I (Juli-Dezember 2010). Werte über einem Verhältnis von 1 (100 %) bedeuten, dass der betreffende Raum vom Verfahren als unzulässig eingestuft wurde.

A.3. Raumübersicht (Kennwerte) und Verfahrensvergleich der Messphase I (2010)

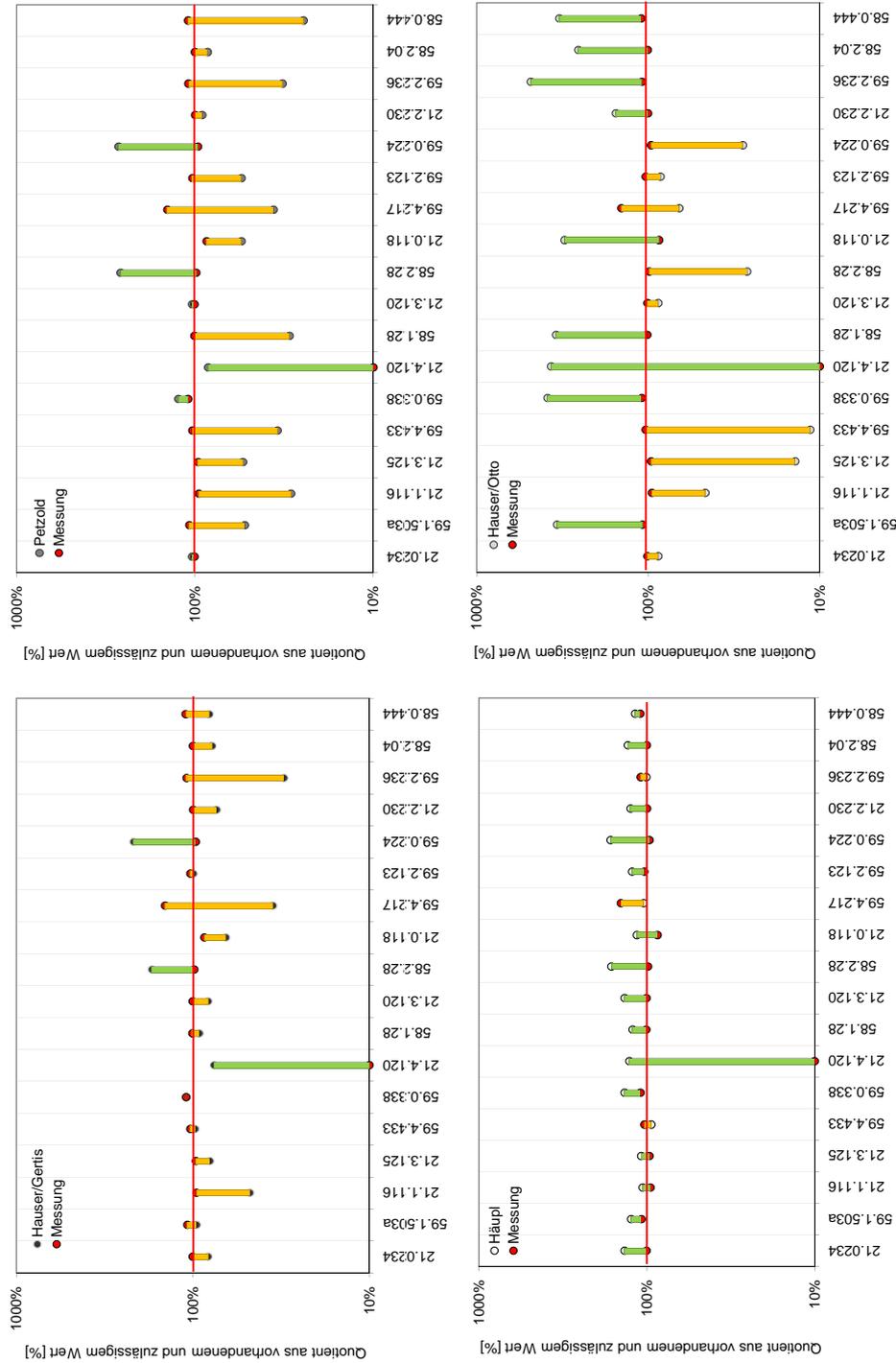


Abbildung A.9.: Darstellung der Verfahrensergebnisse und der Messergebnisse als Quotient aus zulässigem und vorhandenem Wert für alle nicht klimatisierten Räume in den Bauten des Universitätsklinikums in der Messphase I (Juli-Dezember 2010). Die Messwerte wurden ebenfalls als Quotient aus Ist-Wert (gemessener Maximaltemperatur) und Grenzwert (30°C) dargestellt. Werte über einem Verhältnis von 1 (100 %) bedeuten, dass der betreffende Raum nach Messung bzw. nach Bewertung unzulässig ist. Die Abweichungskennzeichnung zwischen Messwert und Kennwert ist orange sofern der Messwert den Kennwert überschreitet und grün sofern der Kennwert oberhalb des Messwertes liegt.

A.4. Übersichten Gebäudesimulation, Behaglichkeitsmodelle

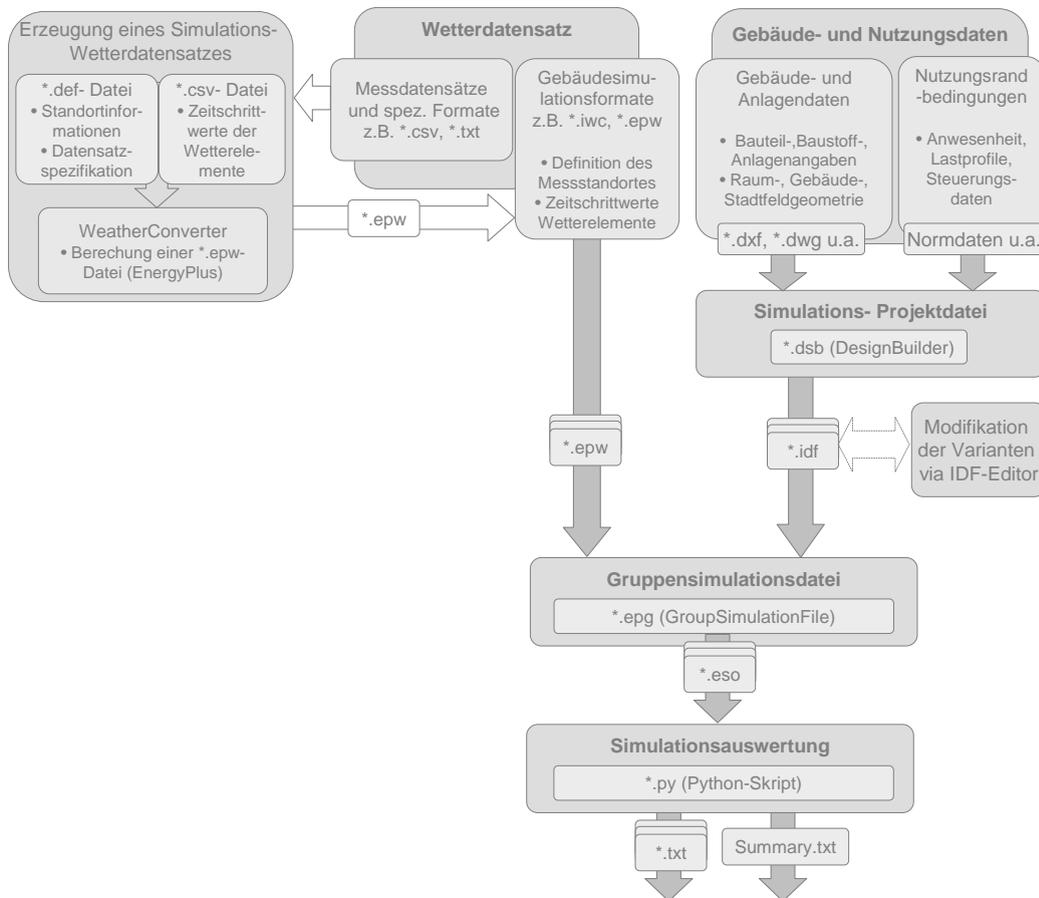


Abbildung A.10.: Darstellung der Vorgehensweise zur Durchführung von Simulationsstudien bzw. Gruppensimulationen mit mehreren unterschiedlichen Wetter- und Gebäudedatensätzen für die Simulationssoftware EnergyPlus

A.5. Raumübersicht (Kennwerte) der Messphase II (2011)

Tabelle A.4.: Bezeichnung, Nutzung und Kennwerte der in der zweiten Phase im Jahr 2011 gemessenen Zonen des Universitätsklinikums Dresden: Ausrichtung w_{Ausr} , Luftvolumen V_{Netto} , Fensterflächenanteil $f_{Fenster}$ und mittlerer U-Wert der Fassade U_m

Gebäudekennung, Nutzung	w_{Ausr}	V_{Netto}	$f_{Fenster}$	U_m
Haus 21 / 0.232 Patientenzimmer	O	79.4	49.3%	$1.7 \frac{W}{m^2K}$
Haus 21 / 1.121 Patientenzimmer	N	91.7	53.8%	$1.7 \frac{W}{m^2K}$
Haus 21 / 2.424 Patientenzimmer	O	63.2	71.5%	$1.8 \frac{W}{m^2K}$
Haus 21 / 2.328 Patientenzimmer	O	65.3	72.4%	$1.8 \frac{W}{m^2K}$
Haus 21 / 2.416 Patientenzimmer	W	65.3	72.9%	$1.8 \frac{W}{m^2K}$
Haus 21 / 3.421 Patientenzimmer	W	80.9	38.0%	$1.6 \frac{W}{m^2K}$
Haus 21 / 3.221 Patientenzimmer	W	66.7	38.2%	$1.6 \frac{W}{m^2K}$
Haus 21 / 3.115 Patientenzimmer	W	62.8	71.2%	$1.8 \frac{W}{m^2K}$
Haus 21 / 3.114 Patientenzimmer	W	62.6	71.2%	$1.8 \frac{W}{m^2K}$
Haus 21 / 4.421 Patientenzimmer	W	80.0	37.7%	$1.6 \frac{W}{m^2K}$
Haus 21 / 4.221 Patientenzimmer	W	68.2	37.7%	$1.6 \frac{W}{m^2K}$

A.6. Kalibrierverfahren nach Reddy und Sun

Das Kalibrierverfahren nach Reddy und Sun zielt auf die Minimierung folgender Zielfunktion ab:

$$M(b) = \sum_{i=1}^t \left(f_{i,Type}^{\delta} \cdot \delta_{i,Sim-Meas}^2 \right) + \sum_{j=1}^n \left(f_{j,Pref}^b \cdot (b_j - b_{j,BestGuess})^2 \right) \quad (A.1)$$

Diese Funktion beinhaltet für jede Kombination der zu ermittelnden Eingangsparameter b des Simulationsmodells einen Term für die Abweichung zwischen Simulationsergebnis und Messung, $\delta_{i,Sim-Meas}^2 = (m_{i,Sim} - m_{i,Meas})^2$, sowie einen Term für die Abweichung zwischen den ersten Wertannahmen, $b_{i,BestGuess}$ und den aktuellen Werten b_i der Parameterkonstellation. Der erste Term wird über alle Zeitschritte t der Simulation bzw. Messung aufsummiert. Der zweite Term wird über alle zu ermittelnden Eingabeparameter aufsummiert. Beide Summanden der Funktion enthalten einen Wichtungsfaktor f . Da die von Reddy und Sun vorgeschlagene Prozedur für die Kalibrierung von Energieverbrauchskennwerten erarbeitet wurde, ist der erste Faktor, $f_{i,Type}$, dafür gedacht, unterschiedliche Energieträger oder auch Jahresphasen zu wichten. Der zweite Faktor dient der Wichtung der unterschiedlichen Parameter in Bezug auf ihre Abweichung vom Startwert. [Sun u. Reddy, 2006, S. 179]

Die Kalibrierungsprozedur zur Ermittlung dieser Minimierfunktion besteht im Wesentlichen aus vier Arbeitsschritten. Diese sind die Ermittlung relevanter Parameter mittels Sensitivitätsanalyse (1), die Identifikation der ermittelbaren Parameteranzahl (2), die Ermittlung einer eindeutig identifizierbaren Parameterkonstellation (3) sowie die Kalibrierungsrechnungen zur Ermittlung der Parameterwerte (4). [Sun u. Reddy, 2006]

Die Sensitivitätsanalyse dient der Unterscheidung starker, d.h. einflussreicher Parameter von weniger einflussreichen Kennwerten. Letztere werden mit ihren Ausgangswerten beibehalten und in den nachfolgenden Schritten ignoriert. Die Grenze zwischen diesen beiden Parameterklassen wird mit Hilfe von Sensitivitätskoeffizienten und einer nutzerabhängigen Grenzwertangabe gezogen. Die Sensitivitätskoeffizienten werden allgemein als Änderung des Simulationsergebnisses in Bezug auf die

Änderung des Parameters im Finite- Differenzen- Ansatz berechnet. [Sun u. Reddy, 2006, S. 181, Gl.4]

$$SC_b = \frac{\partial j}{\partial b_b} = \frac{\Delta j}{\Delta b_b} \quad (\text{A.2})$$

Es gibt zwei Schwierigkeiten bei der Ermittlung dieser Sensitivitätskoeffizienten. Erstens ist der Koeffizient von dem Betrag der anderen unsicheren Parameter abhängig und zweitens ist er von der Auswahl des Intervalls abhängig. Zur Lösung dieser Probleme gibt es unterschiedliche Ansätze welche zum Teil sehr zeitintensiv sind. [Sun u. Reddy, 2006, S. 182, Abs. 1]

Der zweite und dritte Schritt der Prozedur befassen sich mit der Ermittlung eindeutig identifizierbarer Parameter. Die Vorgehensweise beruht auf der Annahme dass eine eindeutige Identifikation einer Parameterkonstellation immer dann möglich ist, wenn die Sensitivitätskoeffizienten im betrachteten Intervall nicht linear voneinander abhängig sind. Zuerst wird hierfür die Anzahl der identifizierbaren Parameter mit einem mathematischen Verfahren¹ ermittelt. Anschließend werden, beginnend mit den Parametern welche die höchsten Sensitivitätskoeffizienten aus Schritt 1 aufweisen, die nicht-identifizierbaren Parameter durch paarweisen Vergleich ausfindig gemacht.²

Im letzten Schritt des Verfahrens werden die Werte der eindeutig identifizierbaren einflussreichen Parameter berechnet. In diesem Schritt wird die zu minimierende Zielfunktion für zahlreiche Wertekombinationen evaluiert. Diese Kombinationen bestehen aus einer Variation aller eindeutig und nicht- eindeutig identifizierbaren einflussreichen Parameter.³

¹Die Anzahl der eindeutig identifizierbaren Parameter wird über den Rang der Hesse-Matrix berechnet. [Sun u. Reddy, 2006, S. 185 f.]

²Es wird jeweils für zwei Parameter überprüft, ob eine Variation der Parameterbeträge zu untereinander korrelierenden Datenreihen (Korrelationskoeffizienten) führt. Falls ja, wird der Kennwert mit dem geringeren Sensitivitätskoeffizienten auf dem Ausgangswert belassen, von den weiteren Vorgängen ausgeschlossen, durch den nächst-sensitiven Parameter ersetzt und die Prozedur damit erneut durchgeführt. [Sun u. Reddy, 2006, S. 186]

³Die nicht- eindeutig identifizierbaren Parameter werden im nutzerdefinierten Variationsbereich diskretisiert, die eindeutig identifizierbaren Parameter werden im nutzerdefinierten Variationsbereich zufallsbedingt variiert. Im vorgestellten Verfahren erfolgte diese Variation mit einem Monte-Carlo- Verfahren (Latin Hypercube MC). [Sun u. Reddy, 2006, S. 188]

Peggy Freudenberg

Entwicklung und Kalibrierung einer Planungsmethode für Nichtwohngebäude mit besonderen raumklimatischen Anforderungen

In der Arbeit wird die aktuelle Sachlage zur Bemessung des Sommerlichen Wärmeschutzes betrachtet. Untersuchungsgegenstand sind drei Gebäude des Universitätsklinikums Dresden. Es werden die wichtigsten bestehenden Verfahren dargelegt und an Hand von Messungen bewertet. Zu diesen Verfahren gehören Handrechenverfahren, beispielsweise jenes nach DIN 4108-2, sowie ein exemplarisches Simulationsverfahren. Aus der Anwendung und Bewertung der Aussagefähigkeit ergibt sich eine Empfehlung für den Planungseinsatz.

Die Gebäudesimulationsrechnung birgt die größten Potenziale unter den betrachteten Verfahren. Der Hauptteil der Dissertation beschäftigt sich daher mit den erforderlichen Voraussetzungen für den Praxistransfer dieser Simulationsverfahren. Zwei wichtige Bedingungen waren bislang nicht gegeben: realistische Eingangsdaten und praktikable Auswertungsansätze. Zur Ermittlung der einflussreichen aber meist unsicheren personenabhängigen Eingabepprofile, z.B. Profile der Sonnenschutzsteuerung oder Fensteröffnung, wird ein einfaches Kalibrierverfahren vorgestellt. Dieses erlaubt die sukzessive Identifikation der unbekanntenen Profile auf der Grundlage von Abhängigkeitsdiagrammen sowie einfachen Raumklimamessungen und Außenklimadaten. Für eine praxiserichte Auswertung der Simulationsmodelle werden die wesentlichen Ansätze zur Raumklimabewertung erläutert. Es folgt eine Bewertung der Anpassbarkeit auf besondere Gebäudenutzer (Ältere, Kinder etc.) und der Aussagefähigkeit dieser Modelle unter Zuhilfenahme von publizierten Untersuchungsergebnissen.

ISBN 978-3-8167-9594-0



9 783816 795940