

# SOMMERLICHER WÄRMESCHUTZ

## Vergleich von Berechnungsansätzen und Entwicklung eines Planungsinstrumentes für Entwurfsfindung und Nachweis

DIPL.-ING.(FH) DIPL.-ING. JOACHIM N. NACKLER

AUSGEFÜHRT ZUM ZWECHE DER ERLANGUNG DES AKADEMISCHEN GRADES  
EINES DOKTORS DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN UNTER DER LEITUNG  
VON

Ao. Univ. Prof. i.R. Dipl.-Ing. Dr. KLAUS KREČ  
E253  
INSTITUT FÜR ARCHITEKTUR UND ENTWERFEN

DISSERTATION

eingereicht an der  
Technischen Universität Wien, Fakultät für  
ARCHITEKTUR UND RAUMPLANUNG

JOACHIM NATHANAEL NACKLER  
Matrikelnr. 0526591  
Ausstellungsstraße 33  
1020 Wien

Wien, im März 2017

© Copyright 2017 Dipl.-Ing.(FH) Dipl.-Ing. Joachim N. Nackler

Alle Rechte vorbehalten

# Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus anderen Quellen entnommenen Stellen als solche gekennzeichnet habe.

Wien, am 10. Mai 2017

Dipl.-Ing.(FH) Dipl.-Ing. Joachim N. Nackler

# Inhaltsverzeichnis

<b>Erklärung</b>	<b>iii</b>
<b>Vorwort</b>	<b>viii</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>x</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung . . . . .	1
1.1.1 Sommerliche Raumüberhitzung . . . . .	1
1.1.2 Klimawandel . . . . .	2
1.1.3 Planung für ArchitektInnen . . . . .	6
1.2 Zielsetzung . . . . .	9
1.2.1 Vergleich verschiedener Berechnungsmethoden . . . . .	9
1.2.2 Hilfestellung für PlanerInnen . . . . .	9
<b>2 Einführung in theoretische Grundlagen</b>	<b>11</b>
2.1 Wärmetechnische Begriffsbestimmungen . . . . .	11
2.1.1 Physikalische Begriffe . . . . .	11
2.1.1.1 Wärme, -strom, -stromdichte . . . . .	11
2.1.1.2 Wärmeübertragung . . . . .	12
2.1.1.3 Temperatur . . . . .	17
2.1.2 Weitere Kenngrößen . . . . .	18
2.1.2.1 U-Wert . . . . .	20
2.1.2.2 Temperaturamplitudendämpfung . . . . .	21
2.1.2.3 Temperaturdurchgriffskoeffizient I . . . . .	22
2.2 Sonnenbahn und Solarstrahlung . . . . .	23
2.3 Wärmeübertragung und Strahlungsdurchgang bei Verglasungen . . . . .	28
2.3.1 Gesamtenergiedurchlassgrad g . . . . .	29
2.4 Wärmespeicherung von Baukonstruktionen . . . . .	30

2.4.1	Auswirkung auf operative Raumtemperatur und Heizwärmebedarf . . . . .	40
2.5	Einflussfaktoren auf das sommerliche Innenraumklima .	45
2.5.1	Klimabedingter Einfluss . . . . .	48
2.5.1.1	Thermische Randbedingungen . . . . .	48
2.5.1.2	Solare Einträge . . . . .	49
2.5.2	Material- und konstruktionsbedingter Einfluss .	51
2.5.2.1	Bauweise, Bauteilaufbauten, Oberflächen	51
2.5.2.2	Wärmeschutzstandard und Dämmstoffart	53
2.5.2.3	Verglasung . . . . .	54
2.5.3	Standort und geometriebedingter Einfluss . . .	54
2.5.3.1	Standort, Umgebung . . . . .	54
2.5.3.2	Verschattung . . . . .	55
2.5.3.3	Raumgeometrie . . . . .	56
2.5.3.4	Fenster-, Bauteilgeometrie und Ausrichtung . . . . .	57
2.5.4	Nutzungsbedingter Einfluss . . . . .	58
2.5.4.1	Lüftung . . . . .	58
2.5.4.2	Innere Lasten . . . . .	60
2.5.4.3	(Beweglicher) Sonnenschutz . . . . .	61
2.5.4.4	Einrichtungsgegenstände . . . . .	62
2.5.5	Benötigte Variablen für Raumsimulation unter sommerlichen Bedingungen . . . . .	63
2.6	Instationäre Wärmeleitung, Wärmespeicherung . . . .	65
2.7	Energiebilanz . . . . .	67
2.7.1	Stationäre Lösung . . . . .	67
2.7.2	Instationäre Lösung . . . . .	68
2.7.2.1	Zeitschrittverfahren . . . . .	68
2.7.2.2	Periodisch eingeschwungenes Verfahren	70
2.8	Thermische Behaglichkeit . . . . .	88
2.8.1	Normative Lage . . . . .	90
2.8.1.1	ÖNorm EN ISO 7730 . . . . .	90
2.8.1.2	ÖNorm EN 15251 . . . . .	92
2.8.2	Bewertung anhand operativer Temperatur . . .	92
<b>3</b>	<b>Methoden zur Bewertung der Sommertauglichkeit</b>	<b>100</b>
3.1	Normative Lage . . . . .	100
3.1.1	Österreich: ÖNorm B 8110-3, OIB Richtlinie 6 .	100
3.1.2	Deutschland: DIN 4108-2 . . . . .	101
3.1.3	Schweiz: SIA 180 . . . . .	102
3.1.4	Europa: EN ISO 13791, EN ISO 13792 . . . . .	103
3.2	Vereinfachte Verfahren . . . . .	104

3.2.1	Stationäre Überslagsberechnung . . . . .	105
3.2.2	Vereinfachtes Verfahren der ÖNorm B 8110-3 . . . . .	107
3.2.3	Verfahren anhand Sonneneintragskennwerte der DIN 4108-2 . . . . .	114
3.2.4	Verfahren der SIA 180 . . . . .	114
3.2.4.1	Verfahren 1 . . . . .	114
3.2.4.2	Verfahren 2 . . . . .	116
3.2.5	Problempunkte vereinfachter Verfahren . . . . .	118
3.3	Instationäre Simulationsverfahren . . . . .	123
3.3.1	Zeitschrittverfahren . . . . .	124
3.3.2	Periodisch eingeschwungenes Verfahren . . . . .	125
3.3.3	1D- versus 3D-Verfahren . . . . .	126
<b>4</b>	<b>Programme zur Berechnung</b>	<b>128</b>
4.1	Vereinfachte Verfahren . . . . .	128
4.1.1	Bauphysiksoftware Österreich . . . . .	128
4.1.2	PHPP . . . . .	128
4.2	Simulation 1D . . . . .	129
4.2.1	Prototyp für Bauphysiksoftware Österreich . . . . .	130
4.2.2	Trnsys . . . . .	136
4.2.3	Tas . . . . .	137
4.2.4	EnergyPlus . . . . .	139
4.2.5	Geba . . . . .	140
4.2.5.1	Historischer Abriss . . . . .	140
4.2.5.2	Berechnungsverfahren und Datengrund- lagen . . . . .	141
4.3	Simulation 3D . . . . .	143
<b>5</b>	<b>Validierung – Berechnungsergebnisse im Vergleich</b>	<b>146</b>
5.1	Prototyp für Bauphysiksoftware Österreich . . . . .	149
5.2	Geba . . . . .	166
5.3	Trnsys . . . . .	174
5.4	Tas . . . . .	176
<b>6</b>	<b>Planungshilfe für ArchitektInnen</b>	<b>182</b>
6.1	Allgemein gültige Planungshinweise . . . . .	182
6.2	Entwicklung eines Werkzeuges für Planung und Nachweis	185
6.2.1	Anforderungen . . . . .	185
6.2.2	Ansätze und Vorarbeiten . . . . .	188
6.2.2.1	SketchUp Extension . . . . .	189
6.2.2.2	Revit Add-On . . . . .	190
6.2.2.3	Java Applet . . . . .	192
6.2.3	Programmarchitektur . . . . .	202

6.2.4	Verwendete Technologien . . . . .	203
6.2.4.1	HTML5 . . . . .	204
6.2.4.2	JavaScript, ECMAScript . . . . .	204
6.2.4.3	WebGl und Three.js . . . . .	205
6.2.4.4	Java Webservice, Axis2, Tomcat, IIS . . . . .	206
6.2.5	Objektorientiertes Design . . . . .	207
6.2.6	Berechnungsmethode und Validierung . . . . .	209
6.2.7	Usability Engineering . . . . .	209
6.2.8	Programmbeschreibung und -ablauf . . . . .	210
6.2.9	Programmiertechnischer Auszug . . . . .	226
6.2.9.1	Geometrierzeugung . . . . .	226
6.2.9.2	3D-Interaktion . . . . .	231
6.2.9.3	Flächen- und Volumenberechnung . . . . .	231
6.2.9.4	Schnittstelle zum Rechenkern . . . . .	232
6.2.10	Umfrage . . . . .	233
6.2.11	Ausblick . . . . .	235
<b>7</b>	<b>Optimierung eines Entwurfes</b>	<b>238</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Erkenntnisse</b>	<b>250</b>
8.1	Planung für ArchitektInnen . . . . .	251
8.2	Einflussfaktoren . . . . .	252
8.3	Vergleich von Berechnungsmethoden . . . . .	255
8.4	Validierung . . . . .	257
8.5	Programmentwicklung . . . . .	259
<b>A</b>	<b>Symbole und Einheiten</b>	<b>262</b>
<b>B</b>	<b>Aufbauten Simulation</b>	<b>265</b>
<b>C</b>	<b>Validierungs-Vorgaben EN ISO 13791, 13792</b>	<b>267</b>
<b>D</b>	<b>Inhalt der CD-ROM</b>	<b>273</b>
D.1	PDF-Dateien . . . . .	273
D.2	Bilddateien . . . . .	273
D.3	Programm Quellcode . . . . .	273
D.4	Sonstiges . . . . .	275
<b>E</b>	<b>Curriculum Vitae</b>	<b>276</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>279</b>

# Vorwort

Mein zunehmendes Interesse an der Bauphysik gegen Ende meines Architekturstudiums an der technischen Universität Wien, meine Faszination für Bauteil- und Gebäudesimulation und auch die Möglichkeit einer professionellen und kompetenten Betreuung an der TU führten zu der Entscheidung, das große Vorhaben einer Dissertation im Jahr 2012 zu starten.

Zum größten Teil entstand die vorliegende Arbeit neben meiner Beschäftigung als Universitäts-Assistent am Institut für Architekturwissenschaften der TU Wien. Die Dissertation dominierte somit die letzten Jahre hauptsächlich die Zeit neben dem Beruf, die man als sehr intensiv, arbeitsaufwändig und lehrreich beschreiben kann.

Die Entstehung und der Abschluss einer Doktorarbeit hängen neben dem uneingeschränkten Interesse an der Thematik, dem Fleiß, der Zielstrebigkeit und dem Durchhaltevermögen der DissertantInnen auch wesentlich von den BetreuerInnen ab. Mit Herrn ao.Univ.Prof.i.R. Dipl.-Ing. Dr.techn. Klaus Kreč habe ich einen Betreuer zur Seite gehabt, dem ich für seinen überdurchschnittlich großen Einsatz tiefe Dankbarkeit ausdrücken möchte. Durch sein bewundernswertes (Detail-)Wissen sind keine Fragen offen geblieben und gleichzeitig hat er mir in schwierigen Phasen, durch seinen Blick für das Wesentliche, immer den richtigen Weg gewiesen. Selbstlos hat er keine Gelegenheit verstreichen lassen, sein Wissen weiterzugeben und mich zu fördern – er ist mir immer mit Rat und Tat zu Seite gestanden. Prof. Klaus Kreč war für mich im wahrsten Sinne des Wortes ein „Doktorvater“. Dafür gebührt ihm mein größter Dank.

Herrn ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Purgathofer danke ich für die fachlichen Ratschläge und den Input von Seiten der Informatik sowie das Gutachten zu der Arbeit. Bei den weiteren Gutachtern o.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Wolfgang Winter, als meinem Vorstand am Institut für Architekturwissenschaften, sowie Herrn Architekten univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Martin Treberspurg bedanke ich mich herzlich für ihre Stellungnahmen. Herrn Prof. Winter bin ich überdies auch für die Ermöglichung des halbjährigen Sabbaticals



sehr verbunden – es hat wesentlich zur Fertigstellung der Dissertation beigetragen. Mein Dank gilt auch Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alireza Fadaei, den ich als Kollegen an der Abteilung für Tragkonstruktionen und Ingenieurholzbau sehr schätzte und der mir stets in allen Belangen zur Seite stand. Frau Architektin Univ.Ass. Dipl.-Ing. MSc. Dr. techn. Doris Österreicher danke ich für die Unterstützung bezüglich Gutachten sowie für die Einschätzung des im Zuge der Arbeit entwickelten Tools *Thesim3D* und ihre diesbezüglich hilfreichen Anmerkungen. Auch den vielen weiteren Probanden danke ich für das Erübrigen ihrer Zeit zum Testen des Programms. Für wertvolle Gespräche und die Hilfe bei der Bereitstellung von Simulationssoftware bedanke ich mich bei Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Holzer und Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Karin Stieldorf. Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bednar sei für die Kritik an jenen Abschnitten der Dissertation gedankt, die den Prototyp für Bauphysiksoftware betreffen.

Meiner Kommilitonin und guten Freundin Anna bin ich für das Korrekturlesen und ihr detektivisches Aufspüren aller noch so versteckten Fehler sehr dankbar.

Herzlichen Dank möchte ich meiner Familie aussprechen, vor allem meinen Eltern, die mich mit ihrer grenzenlosen Fürsorge und Unterstützung durch meine Studien begleitet haben. Es macht mich glücklich, ein so inniges Verhältnis zu ihnen zu haben.

Meiner lieben Carla gilt auch riesiger Dank, dass sie trotz meiner zeitintensiven Beanspruchung durch die Dissertation – auch an den eigentlichen Feierabenden und den meisten Wochenenden – stets mit Verständnis hinter mir stand. Überdies war sie mir bei vielen Fragestellungen (mit ihrem besonderen architektonischen und grafischen Feingefühl) eine hilfreiche Diskussionspartnerin. Gemeinsame Freizeit wird auf jeden Fall nachgeholt! BBB

Joachim Nathanael Nackler

# Kurzfassung

Aufgrund globaler Erwärmung und zeitgenössischer Architektur, welche viel Glas und Leichtbau verwendet, ist die Problematik der sommerlichen Überwärmung von Räumen allgegenwärtig. Es gibt ein vereinfachtes Verfahren der ÖNorm B 8110-3, das für Sommertauglichkeitsnachweise in Österreich überwiegend eingesetzt wird. Dieses führt jedoch aufgrund des vereinfachten Berechnungsansatzes zu keiner ausreichenden Planungssicherheit und ist somit von realistischeren Ergebnissen und Möglichkeiten thermischer Gebäudesimulationsprogramme weit entfernt. Gebäudesimulationsprogramme sind aber in der Regel in ihrer Handhabung zu komplex und aufwändig, um ArchitektInnen beim Entwurfsprozess zu unterstützen.

Viele Planungsentscheidungen, die in frühesten Planungsphasen getroffen werden, haben einen wesentlichen Einfluss auf das sommerliche Temperaturverhalten des Gebäudes und können nachträglich kaum oder nur mit erhöhtem Aufwand geändert werden. Die Überlegungen zum klimagerechten Bauen sollten also bereits in der Entwurfsphase stattfinden. Den ArchitektInnen fehlen dazu aber vor allem für den Sommerfall geeignete und einfach zu bedienende Werkzeuge.

Intendiertes Ziel ist es demnach, ein allgemein zugängliches, intuitives Online Tool mit einer selbsterklärenden, spielerisch zu handhabenden Programmoberfläche zu entwickeln, welches mit keinem Mehraufwand gegenüber einem vereinfachten Verfahren verbunden ist, jedoch zu realitätsnahen Ergebnissen führt. Den ArchitektInnen soll es so auf einfache Weise ermöglicht werden, hinsichtlich des sommerlichen Gebäudeverhaltens einen optimierten Entwurf zu entwickeln. Im Hintergrund werden bauphysikalisch korrekte Ergebnisse anhand einer thermisch dynamischen Gebäudesimulation erzeugt, basierend auf der periodisch eingeschwungenen Berechnungsart im Frequenzbereich. Durch diese speziell für die Fragestellung der hochsommerlichen Raumtemperatur bestens geeignete Methode können Ergebnisse in Echtzeit erhalten werden und zügig verschiedene Varianten überprüft werden.

Überdies werden in der Arbeit wichtige Grundlagen wie z. B. zur Wärmespeicherfähigkeit erläutert und diskutiert, um oft vorherrschenden

de Missverständnisse zu beseitigen. Es werden zudem verschiedene Methoden zur Bewertung der Sommertauglichkeit verglichen, sowie Programme, die diese Methoden implementiert haben, vorgestellt. Des Weiteren werden Validierungen ausgewählter thermisch dynamischer Gebäudesimulationsprogramme anhand der europäischen Norm 13791 präsentiert.



# Abstract

Due to global warming and contemporary architecture, which uses a lot of glass and lightweight constructions, the problem of summerly overheating of rooms is ubiquitous. There is a simplified method according to the Standard B 8110-3, which is predominantly used for assessing the summerly heat protection in Austria. However, due to the simplified calculation approach, no good planning reliability can be assured and is thus far from the more realistic results and possibilities of thermal dynamic building simulation programs. On the other hand building simulation programs are usually too complex and time-consuming to support architects in the design process.

Many planning decisions, which are made in early planning phases, have significant influence on the summerly behaviour of the building and can hardly be changed afterwards or just with increased effort. Considerations regarding climate-friendly building should thus already take place in the design phase. Again, it is problematic that architects lack tools for evaluating the summerly heat protection that can be used easily.

Hence the goal is to develop a generally accessible, intuitive online tool with a self-explanatory, playful interface that is not based on a simplified calculation method, but generates realistic results. The architects will then be easily enabled to develop optimized designs regarding the summerly heat protection. In the background, physically correct results are generated by means of a thermodynamic building simulation, based on a periodically settled calculation method in the frequency domain. Thanks to this method, which is especially suitable for the question of midsummer room temperatures, results can be obtained in real time and different variants can be analysed quickly. Moreover, important aspects such as heat storage capacity are discussed, in order to eliminate often prevailing misunderstandings. In addition, various methods for assessing the summer suitability are compared, as well as programs are presented that implement these methods. Furthermore, validations of selected thermodynamically building simulation programs are presented using the European Standard 13791.



# Kapitel 1

## Einleitung

Einleitend wird in Abschnitt 1.1 die grundsätzliche Problemstellung bezüglich sommerlicher Überhitzung im Kontext Gebäude, sowie der Umgang von ArchitektInnen mit dieser Thematik beleuchtet. Daraus leitet sich die Motivation für diese Arbeit ab, sowie die Zielsetzung zur Verbesserung der Planungsmöglichkeiten für PlanerInnen, die in Abschnitt 1.2 genauer definiert wird.

### 1.1 Problemstellung

#### 1.1.1 Sommerliche Raumüberhitzung

In Bezug auf die Energieeffizienz von Gebäuden und dabei vor allem auf die winterlichen Wärmeverluste über die Gebäudehülle, ist es aus heutiger Sicht Stand der Technik Niedrigenergiehäuser oder Passivhäuser herzustellen und damit den Heizwärmebedarf im Vergleich zu älteren Bestandsgebäuden signifikant zu verringern. Gleichzeitig stellt sich aber nicht nur in älteren Bestandsgebäuden, sondern auch in hochwärmedämmten Neubauten im Sommer des Öfteren unbehagliches, zu warmes Innenraumklima ein.

Gründe dafür gibt es zahlreiche und diese werden auch im einführenden Teil der Arbeit detailliert beleuchtet. Im Allgemeinen wird dafür der bereits längere Zeit anhaltende Trend in der zeitgenössischen Architektur, sich höherer transparenter Anteile in der Gebäudehülle und (aus Gründen der Material- sowie Kosteneffizienz) des Leichtbaus zu bedienen, verantwortlich gemacht. Auch die globale Erwärmung rückt den Fokus nun vermehrt auf diese Problematik. Nicht zuletzt ist aber oft eine unzureichende Planung dafür verantwortlich, dass das Potential passiver Maßnahmen zur Schaffung eines akzeptablen sommerlichen Raumverhaltens nicht ausgeschöpft und somit unnötiger Kühlbedarf generiert wird.

Als „sommertauglich“ wird ein Gebäude verstanden, welches bei guter Tageslichtversorgung weitgehend vor Überhitzung geschützt bleibt und auch in den heißen Sommermonaten angenehme Raumtemperaturen – ohne erheblichen Energieaufwand für aktive Kühlung – in den Innenräumen ermöglicht. Wie es die österreichische Norm definiert, wird in Abschnitt 3.1 beschrieben.

Wesentlich wird es in Zukunft also sein, Gebäude auch für den sommerlichen Wärmeschutz zu optimieren und den Energieeinsatz für ein behagliches Sommerklima in den Gebäuden so gering wie möglich zu halten. In Anbetracht der Ursachen des Klimawandels muss dieses Ziel, wo immer möglich, ohne den Einsatz energieintensiver Klimatisierung erreicht werden – vor allem unter dem Aspekt, dass das thermische Verhalten von Räumen unter hochsommerlichen, außenklimatischen Bedingungen durch planerische (passive) Maßnahmen wesentlich beeinflusst werden kann. Bei Gebäudestandorten in unseren Breiten ist es durchaus möglich, Wohngebäude so zu planen und zu bauen, dass der Wohnkomfort auch während hochsommerlicher Hitzeperioden ohne zusätzlichen Energieaufwand gewährleistet ist. Die Möglichkeit sommerliche Überwärmung von Räumen auf nachhaltige Weise zu verhindern, ist wie geschildert vorhanden – es stellt sich nun die Frage, warum ungeachtet dessen ein Großteil von Räumen in Hitzeperioden zu hohe und damit unbehagliche Raumtemperaturen aufweisen.

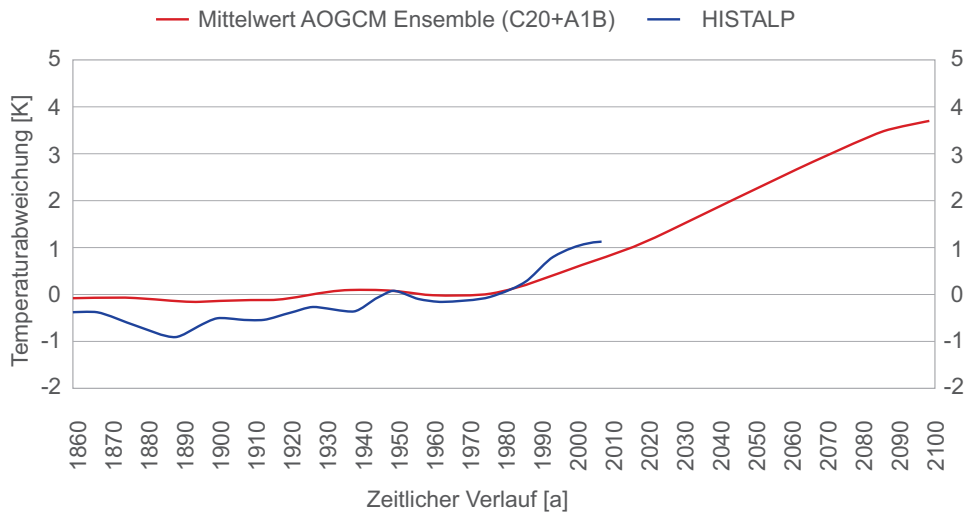
Eine wesentliche Schwierigkeit ist sicherlich darin gegeben, dass ArchitektInnen und anderen Planungsberechtigten keine geeigneten Werkzeuge zur Verfügung stehen, um den sommerlichen Wärmeschutz bereits im Entwurfsstadium auf einfache Weise und verlässlich überprüfen zu können. Diese Problematik wird in Abschnitt 1.1.3 einführend behandelt und in weiterer Folge erstmals ein Lösungsvorschlag geboten.

### 1.1.2 Klimawandel

In den letzten 100 Jahren konnte eine Temperaturerhöhung beobachtet werden – etwa 1 K weltweit und rund 2 K im Alpenraum. Ein Teil dieses Effekts geht nicht auf natürliche Ursachen zurück, sondern ist anthropogen, d. h. durch den Menschen verursacht. Modellberechnungen bis zum Jahr 2100 ergeben eine weitere weltweite Erwärmung um 1,8 bis 4,0 K. (Vgl. [126]).

Der Alpenraum war bis jetzt stärker vom globalen Klimawandel betroffen als andere Gebiete der Erde. Diese Entkoppelung soll sich nach der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) aber längerfristig wieder angleichen. Für eine grobe Abschätzung über die Klimazukunft im Alpenraum werden Simulationsergebnisse aus globalen Klimamodellen verwendet. In Abbildung 1.1 ist die Temperaturent-



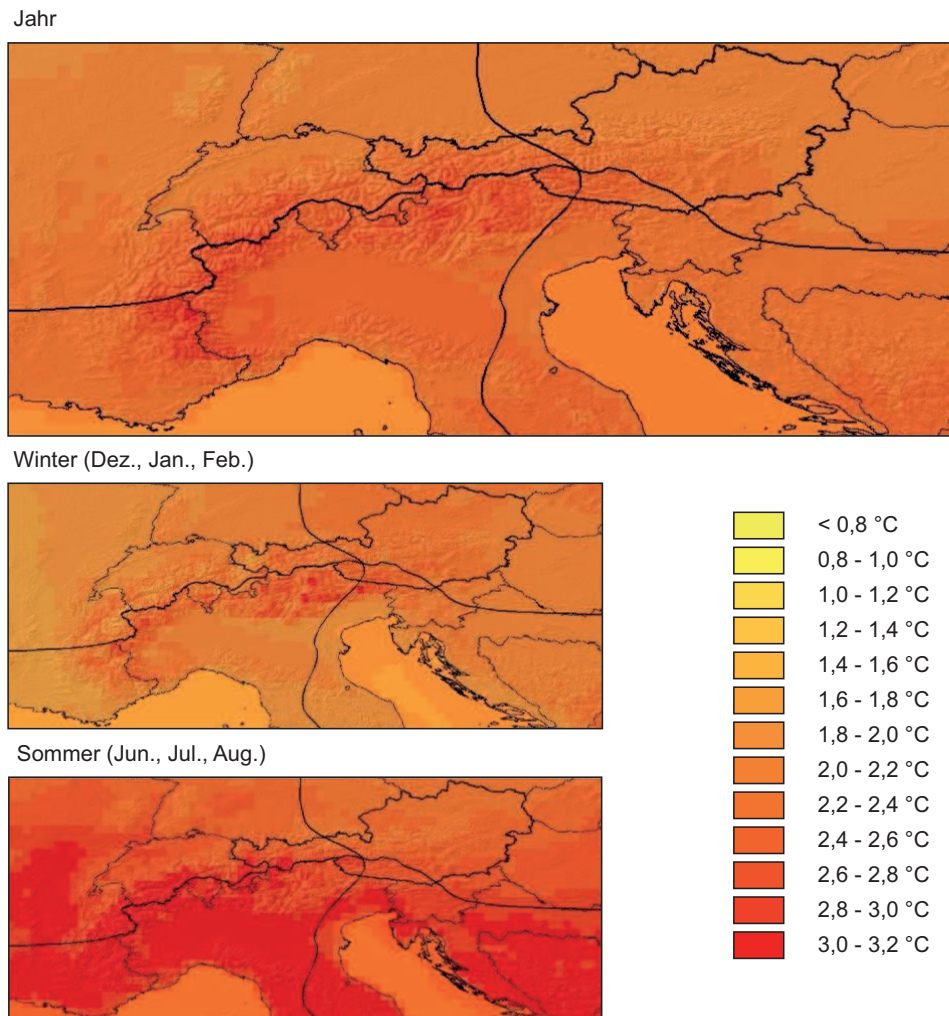


**Abbildung 1.1:** Änderung des Jahresmittels der Lufttemperatur (30-jährig gefiltert) in der GAR bezogen auf das Mittel von 1961-1990 aus Klimamodellierungsdaten (IPCC 2007) und Messdaten. Rot: Median aus 15 globalen Klimamodellen; Basis für diese Abbildung bilden Daten aus über 15 globalen gekoppelten Ozean-Atmosphären Modellen (sog. Multi-Model Ensemble), mit denen Klimaszenarien für den 4. Sachstandbericht des IPCC aus dem Jahr 2007 berechnet wurden. Aus diesen großräumigen Datenfeldern wurde die Temperaturänderung in der GAR relativ zum Referenzzeitraum 1961-1990 extrahiert. Blau: HISTALP-Messdaten (vgl. [125]).

wicklung im erweiterten Alpenraum (GAR) für das Emissionsszenario A1B<sup>1</sup> dargestellt. (Vgl. [125]).

Für umfangreichere Untersuchungen nützt man hingegen Modellergebnisse aus regionalen Klimamodellen. Im Folgenden werden Modellierungsergebnisse aus einem solchen Modell namens COSMO-CLM (CCLM) für das Emissionsszenario A1B zusammengefasst: Bis etwa zur Mitte des 21. Jahrhunderts ist mit einem Temperaturanstieg im Alpenraum von knapp 2K zu rechnen, bezogen auf die World Meteorological Organization (WMO) Normalperiode 1961-1990 (Abbildung 1.2). Die Modellprojektionen zeigen im Jahresmittel eine stärkere Erwärmung in Gebieten wie Südtirol, oder in den südlichen Ausläufern des Alpenbogens, ansonsten ist die Temperaturerhöhung relativ homogen über die gesamte Region. Betrachtet man die Änderungen saisonal, treten größere Unterschiede zu Tage. Eine geringere Erwärmung als im

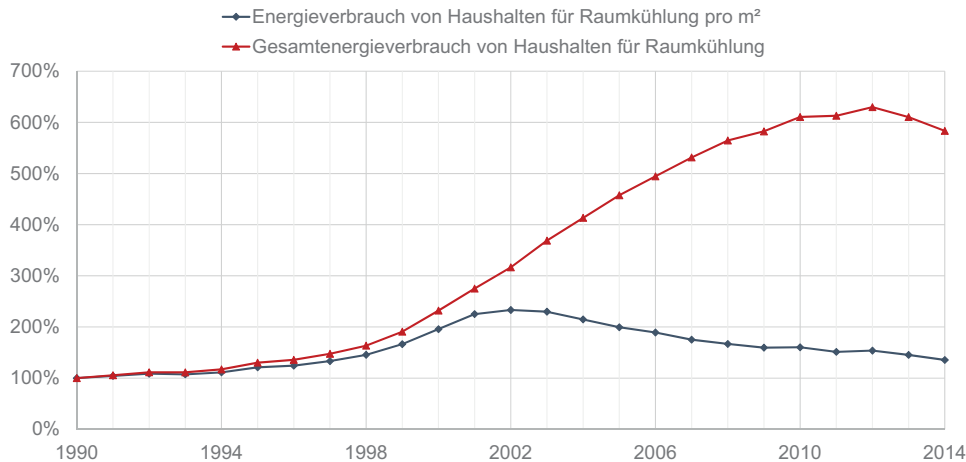
<sup>1</sup>Eines der vier vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, Weltklimarat) entworfenen Emissionsszenarien: A1 – „Die Welt des globalen Wirtschaftswachstums“ mit der Untergruppe B, bei welchem alle Möglichkeiten zur Energiegewinnung (fossil und nicht fossil) gleichberechtigt eingesetzt werden. Siehe dazu [124].



**Abbildung 1.2:** Änderung der Lufttemperatur sowohl im Jahresmittel, als auch im Sommer und Winter von 2041-2070 bezogen auf das Mittel von 1961-1990 aus regionalen Klimamodellierungsdaten des Modells CCLM (DKRZ , [75], [74]); Abbildungen aus einer laufenden Untersuchung an der ZAMG, Abteilung für Klimaforschung. (vgl. [125]).

Jahresmittel wird für die Wintermonate (Dezember, Januar, Februar) simuliert, hierbei vor allem Gebiete wie der Südosten Frankreichs, oder Italien südlich der Alpen. Im Gegensatz dazu berechnet CCLM eine deutlich höhere Erwärmung im Sommer (Juni, Juli, August) für diese Regionen und auch für Teile Kroatiens und Bosnien und Herzegowinas. (Vgl. [125]).

Die Sommer sind auch in Österreich in den letzten Jahrzehnten nachweislich immer heißer geworden. Die Zahlen für Sommertage (25 °C



**Abbildung 1.3:** Energieverbrauch für die Kühlung in Haushalten in der Europäischen Union (EU-28) (vgl. [14]).

und mehr) und Hitzetage (30 °C und mehr) sind deutlich gestiegen. Dabei wurde die relative Häufigkeit von heißen Tagen (Tageshöchsttemperatur  $\geq 30^\circ\text{C}$ ) und Sommertagen (Tageshöchsttemperatur  $\geq 25^\circ\text{C}$ ) für die Perioden 1961 bis 1990 und 2020 bis 2049 für Wien in den Sommermonaten Juni, Juli und August von der ZAMG verglichen. Es zeigt sich ein Anstieg der Häufigkeit von heißen Tagen von 10 % auf 24 % sowie von 40 % auf 69 % im Fall der Sommertage. Diese Entwicklung wird sich laut Klimasimulationen weiter fortsetzen, Hitzeperioden werden häufiger und stärker. Nach aktuellem Stand der Forschung gilt dies als gesichert. Vor allem in den Großstädten wird die Hitzebelastung problematisch. In Kooperation mit der Stadt Wien gab es ein ZAMG-Projekt zum Thema Klimaentwicklung in Wien. Das Ergebnis zeigt, dass es im Zeitraum 1981 bis 2010 in Wien im Durchschnitt 65 Sommertage gab. Für den Zeitraum von 2071 bis 2100 berechnen die Klimamodelle (je nach Emissionsszenario) 20 bis 35 Sommertage mehr, also um rund 30 bis 50 Prozent mehr. (Vgl. [126]).

Diese Erkenntnis verstärkt die Motivation, künftig nachhaltigere Gebäude zu planen, die im Entwurf durch passive Maßnahmen auf diese Entwicklung der (sommerlichen) Temperaturerhöhung reagieren. In Anbetracht des anthropogenen Beitrags zur Klimaerwärmung ist eine Reaktion durch Erhöhung der Anzahl von Klimageräten für behagliches sommerliches Innenraumklima fatal: Man würde sprichwörtlich Öl ins Feuer gießen. Abbildung 1.3 zeigt die Realität: Der Energieverbrauch für Raumkühlung hat sich in der europäischen Union seit dem Jahr 1990 auf beinahe das Sechsfache erhöht.

Im Vergleich des Ausstattungsgrades mit Klimaanlage hat Europa derzeit einen Stand von 5 % im Wohnbereich. In den USA beträgt der Anteil 65 % und in Japan sogar 85 %. Bei Nichtwohngebäuden haben derzeit 27 % der Objekte eine Klimaanlage während es in den USA 80 % und in Japan 100 % sind [117]. Diese Zahlen zeigen deutlich, dass großes Potential zur Energieeinsparung durch geeignete passive Planungsmaßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz gegeben ist.

### 1.1.3 Planung für ArchitektInnen

Der grundsätzliche Planungsablauf für ArchitektInnen ist abgesehen von Großprojekten folgendes Szenario bis hin zu einer behördlichen Einreichung (Abb. 1.4):

Vorentwurfsplanung, Entwurfsplanung und schließlich die Einreichplanung. Erst im Zuge der Einreichung wird ein Energieausweis erstellt und obligatorisch die sommerliche Überwärmung abgeschätzt. Dies passiert in der Regel durch ein vereinfachtes Normverfahren, oder in aufwändiger Form durch komplexe thermische Gebäudesimulationen – dann aber typischerweise nicht durch ArchitektInnen. Die Entwurfsphase ist folglich bereits abgeschlossen und nun muss bei Nichterreichen der Sommertauglichkeit oft zum Entwurfsstadium zurückgekehrt und entsprechende Maßnahmen müssen eingearbeitet werden. Dies ist offensichtlich mit unnötigem Mehraufwand und Kosten verbunden. Vielfach wird auch nachträgliche Schadensbegrenzung betrieben, wie etwa durch energieintensive aktive Gebäudekühlung, nachträgliches Anbringen von Verschattungselementen, die sich dann zumeist nicht in den ursprünglichen architektonischen Entwurf integrieren, etc. Eine von Beginn an geeignete Planung hätte diesen Rückschritt und mit Kosten verbundenen Mehraufwand verhindern können. Die Überlegungen zum klimagerechten Bauen sollten also bereits in der Entwurfsphase stattfinden. Verdeutlicht wird das auch durch ein Zitat aus einem Forschungsprojekt zur Reduktion des Kühlenergiebedarfs von Gebäuden herausgegeben durch das Bundesministerium bmvit<sup>2</sup> [53]:

*Die wirkungsvolle und kosteneffiziente Umsetzung der meisten vorgeschlagenen baulichen Maßnahmen zur Reduktion des Kühlbedarfs erfordert ihre Berücksichtigung in den frühesten Planungsphasen. Viele Planungsentscheidungen, die zu diesem Zeitpunkt getroffen werden, haben einen wesentlichen Einfluss auf das sommerliche Temperaturverhalten des*

---

<sup>2</sup>Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien.

*Gebäudes und können nachträglich kaum oder nur mit erhöhtem Aufwand geändert werden.*

Den ArchitektInnen fehlen dazu aber geeignete und vor allem einfach zu bedienende Werkzeuge. Die Entwicklung eines solchen Werkzeuges wird zu einer der Hauptzielsetzungen der Dissertation, wie in Abschnitt 1.2.2 genauer definiert.

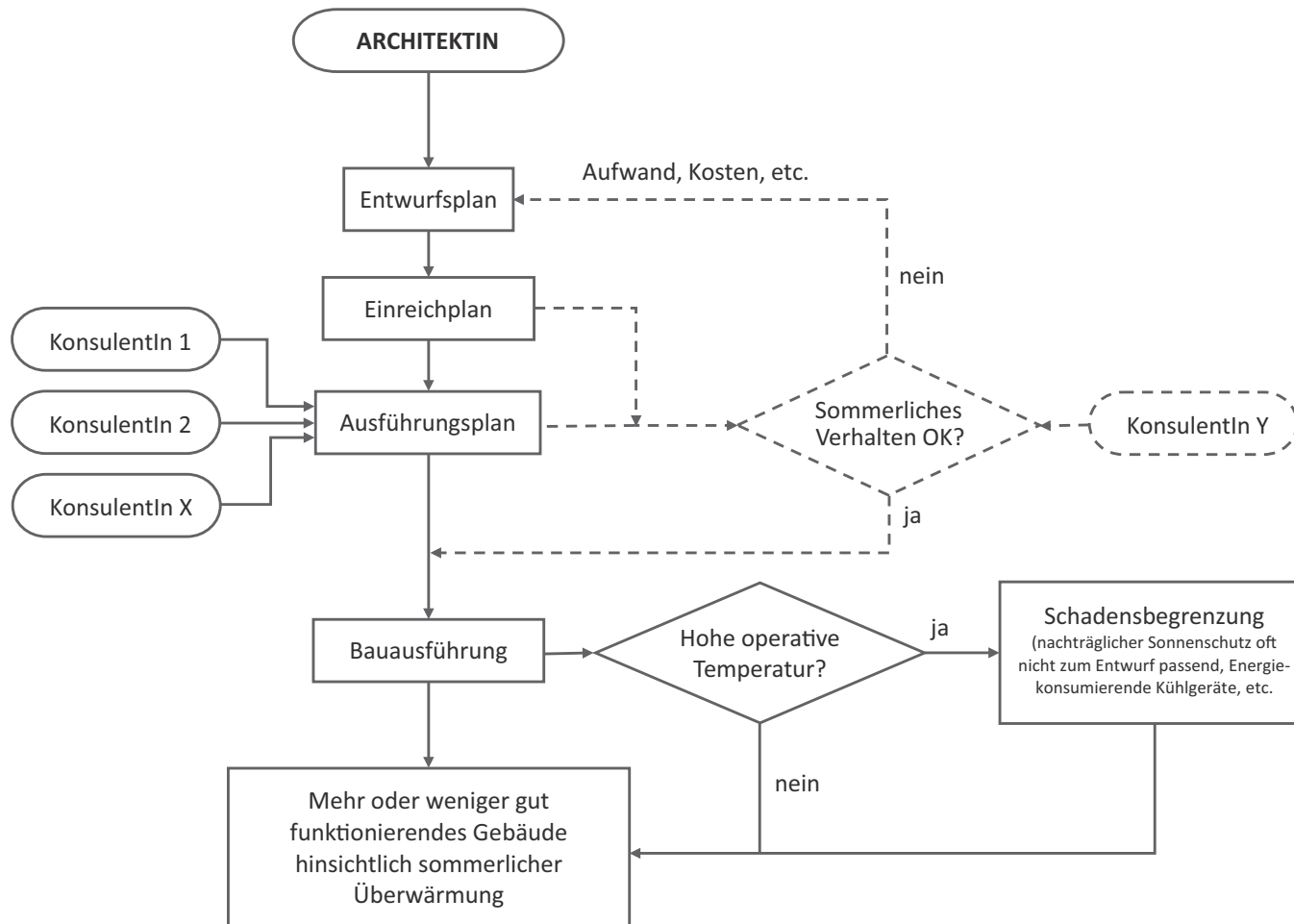


Abbildung 1.4: Ablauf Planung sommerlicher Überwärmung.

## 1.2 Zielsetzung

Wie einführend erläutert, besteht in unseren Breiten auch in Hitzeperioden die Möglichkeit – vor allem in Wohnräumen – behagliches Innenraumklima rein durch passive Planungsmaßnahmen zu erreichen. Die Praxis zeigt jedoch, dass aufgrund fehlender Werkzeuge für ArchitektInnen diese Planungsmaßnahmen nicht ausgeschöpft werden (können). Die wesentliche Zielsetzung für diese Arbeit ist zum Ersten eine geeignete Hilfestellung für PlanerInnen zu schaffen um den sommerlichen Wärmeschutz einfach, schnell und dennoch verlässlich prüfen und nachweisen zu können. Als Basis für die Entwicklung ist als weiteres Ziel ein Vergleich und die Analyse existierender Berechnungsmethoden gesetzt worden. Die Validierung des entwickelten Werkzeuges, sowie anderer ausgewählter thermisch dynamischer Gebäudesimulationsprogramme im Vergleich, wird als weiterer wichtiger Teil zum Erreichen der Zielsetzung angesehen.

### 1.2.1 Vergleich verschiedener Berechnungsmethoden

Als Grundlage zur Auswahl einer geeigneten Berechnungsmethode zur sommerlichen Überwärmung von Räumen für das zu entwickelnde Tool sollen unterschiedliche – vorwiegend normgemäße – Verfahren analysiert werden. Nach Beschreibung der normativen Lage in Österreich, soll vergleichsweise auch die normative, etwas andere Herangehensweise in Deutschland und der Schweiz beleuchtet und folgend zusammengefasst werden. Vor allem das vereinfachte Verfahren zum Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes, das die österreichische Norm B 8110-3 zur Verfügung stellt, soll dabei im Detail diskutiert werden. Von den vereinfachten Bewertungsverfahren wird übergegangen zu detaillierteren Simulationsverfahren, Vor- und Nachteile einzelner Verfahren aufgezeigt, sowie eine Auswahl an Programmen vorgestellt, die die unterschiedlichen Methoden implementieren.

### 1.2.2 Hilfestellung für PlanerInnen

Der in Abschnitt 1.1.3 geschilderten Problematik fehlender geeigneter Tools soll durch die Entwicklung eines intuitiven Werkzeuges zur Entwurfsfindung als auch zum Nachweis entgegnet werden. Es soll ein Tool im Stile eines gängigen Entwurfswerkzeuges für ArchitektInnen geschaffen und durch eine sehr benutzerfreundliche, leicht verständliche Möglichkeit der Raumsimulation erweitert werden. Intention ist es, so die Berührungspunkte vieler ArchitektInnen zu bauphysikalischer Simulationssoftware überbrücken zu können. ArchitektInnen sowie an-

dere PlanerInnen können so bereits in der Entwurfsphase spielerisch die geschilderte Problematik umgehen und im Voraus geeignete Entwürfe erstellen.

Die einfache Bedienung soll aber nicht eine vereinfachte Berechnung bedeuten. Im Hintergrund wird ein komplexes, periodisch eingeschwungenes Berechnungsverfahren angewendet, welches auf Berechnungsalgorithmen des Simulationsprogrammes Geba aufsetzt. Das zu entwickelnde Tool wird in der Folge *Thesim3D* genannt.



## Kapitel 2

# Einführung in theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel sollen nicht nur wichtige Grundlagen für ein besseres Verständnis der weiteren Arbeit geliefert werden, sondern darüber hinaus relevante und oft missverständlich ausgelegte Themen aufgegriffen, diskutiert und analysiert werden.

### 2.1 Wärmetechnische Begriffsbestimmungen

Nach physikalischen Begriffsbestimmungen wie jene zur Wärme, zum Wärmestrom, zur Wärmestromdichte, zur Wärmeleitfähigkeit, zur Temperatur (sowie abgeleitete Größen wie der operativen Temperatur) werden die verschiedenen Arten der Wärmeübertragung erläutert. Zudem werden in diesem Abschnitt weitere wärmetechnische stationäre Kenngrößen wie der U-Wert, aber auch instationäre Kenngrößen vorgestellt und diskutiert. Begriffe und Kennwerte die speziell die Wärmespeicherung im Bauwesen betreffen, werden überdies detaillierter in Abschnitt 2.4 behandelt. Begriffe hinsichtlich Wärmeübertragung und Strahlungsdurchgang bei Gläsern (u. a. der g-Wert) werden näher in Abschnitt 2.3 ausgeführt.

#### 2.1.1 Physikalische Begriffe

##### 2.1.1.1 Wärme, -strom, -stromdichte

Die Wärmemenge  $Q$  ist jene Energie, die zwischen zwei thermodynamischen Systemen aufgrund eines Temperaturunterschieds übertragen wird. Sie wird in der Einheit Joule ( $1\text{ J} = 1\text{ Ws}$ ) oder Wattstunden (Wh) gemessen. Als Wärmestrom  $\Phi$  bezeichnet man die pro Zeiteinheit durch ein Flächenstück hindurchströmende Wärmemenge: Wär-

meströme werden somit in Leistungseinheiten (z. B. Watt) gemessen. Dividiert man den Wärmestrom durch den Flächeninhalt jener Fläche, durch die dieser hindurchtritt, so erhält man eine Wärmestromdichte, also einen flächenbezogenen Wärmestrom (Einheit  $\text{W}/\text{m}^2$ ).

### 2.1.1.2 Wärmeübertragung

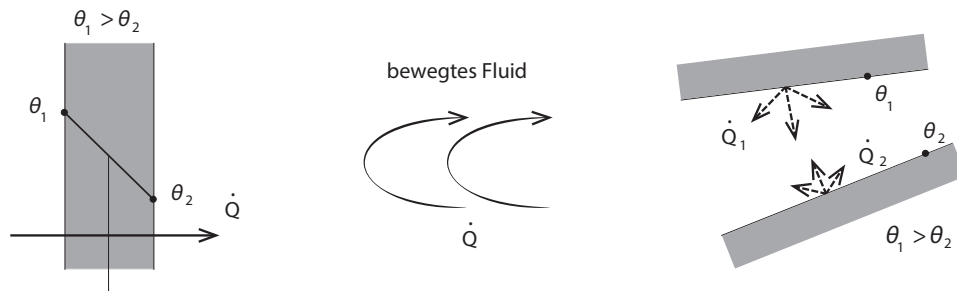
Folgend sollen die Mechanismen der Wärmeübertragung als Grundlage für die weitere Arbeit nach [25], [52], [122], [79], [123], [3], [107] zusammengefasst werden. Örtlich unterschiedliche Temperaturen führen zu einer Wärmebewegung in Richtung des Temperaturgefälles, also gemäß dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik von Bereichen höherer Temperatur (energiereicher) zu Bereichen tieferer Temperatur (energieärmer). Im Winter wird in unseren Breiten demnach Wärme von einem konditionierten Gebäude nach außen abfließen, im Sommer – zumindest in der Regel tagsüber – in das Gebäude eindringen. Der Wärmetransport kann auf drei<sup>1</sup> unterschiedliche Arten erfolgen: in festen Stoffen durch Wärmeleitung (Übertragung von Bewegungsenergie der Teilchen), in Gasen und Flüssigkeiten zusätzlich durch Konvektion (hauptsächlich Energiemitnahme infolge Strömung) und bei strahlungsdurchlässigen Stoffen durch Wärmestrahlung in Form elektromagnetischer Wellen, die im Gegensatz zu den beiden anderen Arten nicht an ein Medium gebunden ist. Die verschiedenen Typen des Wärmetransports treten in der Regel miteinander kombiniert auf. Eine physikalische Größe der Wärmeübertragung ist der Wärmestrom. Im letzten Teil dieses Abschnitts wird der nicht zu vernachlässigende Wärmeübergang zwischen einer Oberfläche und der Luft erläutert.

**Wärmeleitung:** Die Wärmeleitung ist ein Wärmetransportmechanismus, der in festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen auftritt. Die Träger dieses Energietransports sind je nach Medium z. B. Atome, Moleküle oder in metallischen Baustoffen auch Elektronen. Wärmeleitung ist immer an Materie gebunden, eine perfekte Unterbindung von Wärmeleitung stellt daher ein Vakuum dar. Diese Art der Wärmeübertragung ist für den Wärmetransport über die Bauteile selbst relevant.

Die mathematischen Gesetzmäßigkeiten für die Wärmeleitung wurden schon zu Beginn des 19. Jahrhunderts von Joseph Fourier entwickelt. Bei homogenen Stoffen besteht nach dem Fourierschen Wärme-

---

<sup>1</sup>In den meisten Lehrbüchern wird von drei Arten der Wärmeübertragung berichtet, in vielen von vier, teilweise von zwei: Wärmeleitung und Strahlung sind in jedem Fall vertreten. Konvektion wird z.T. zur Wärmeleitung gezählt und oft wird die Konvektion noch in freie und erzwungene Konvektion unterteilt.



**Abbildung 2.1:** Arten der Wärmeübertragung (vgl. [3]): Links: Wärmeleitung in einem Festkörper oder ruhenden Fluid. Mitte: Wärmeübertragung über ein bewegtes Fluid (Konvektion). Rechts: Wärmehaustausch durch Strahlung zwischen zwei Oberflächen.

stromansatz zwischen der Wärmestromdichte  $q$  und der Temperaturverteilung im Körper die Beziehung

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad}\theta \quad (2.1)$$

wobei  $\vec{q}$  der Vektor der Wärmestromdichte,  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit und  $\theta$  die Temperatur darstellt. Die sich bei Wärmeleitung einstellende Wärmestromdichte ist somit dem – durch den Gradientenvektor ausgedrückten – Temperaturgefälle proportional. Als Proportionalitätsfaktor tritt die Wärmeleitfähigkeit des Materials auf.

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  [W/(mK)] ist eine Materialeigenschaft, welche angibt, wie viel Wärmemenge durch einen Stoff mit einem Meter Dicke pro  $\text{m}^2$  und einem Kelvin Temperaturunterschied dringt. Je größer dieser Kennwert, desto weniger ist der Stoff für Wärmedämmzwecke geeignet. Je nach Struktur und Aufbau schwankt sie bei festen Stoffen in sehr weiten Grenzen. Bei Metallen ist die Wärmeleitfähigkeit wegen der vorhandenen freien Elektronen sehr groß. Nichtmetallische Stoffe leiten generell die Wärme bedeutend schlechter als Metalle; ihre physikalische und chemische Struktur ist eine wesentliche Einflussgröße. So ist bei amorphen Stoffen die Wärmeleitfähigkeit kleiner als bei solchen mit einer kristallinen Struktur. Anisotrope Stoffe folgen nicht mehr der Regel, dass die Wärmeleitfähigkeit unabhängig von der Richtung des Wärmestroms ist. Bei Holz z. B. unterscheidet sich die Wärmeleitfähigkeit sehr deutlich beim Wärmestrom senkrecht und parallel zur Faserichtung. In der Regel ist die Wärmeleitfähigkeit temperaturabhängig. Bei Stoffen, die wasseraufnahmefähig sind, beeinflusst auch deren Wassergehalt die Wärmebewegung. Als Stoffwert ist die Wärmeleitfähigkeit nur experimentell bestimmbar (vgl. [25]). Die Wärmeleitung (und auch Wärmespeicherung) in plattenförmigen Bauteilen, die im Hochbau ja

die Regel darstellen, wird in [67] auf verständliche Weise abgehandelt.

Erfolgt der Wärmetransport bei zeitlich konstantem Wärmestrom, sind auch die Temperaturen an jedem Ort zeitunabhängig und man spricht von stationärer Wärmeleitung. Ändert sich der Wärmestrom zeitlich, verändern sich mit der Zeit auch die Temperaturen – es handelt sich um instationäre Wärmeleitung (siehe Abschnitt 2.6). Im eindimensionalen stationären Fall nimmt Fouriers Gesetz der Wärmeleitung eine einfache Form an und lässt bei weiterer Umformung und unter Berücksichtigung der Wärmeübergangswiderstände den Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) erkennen.

$$q = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}} \cdot (\theta_{a,i} - \theta_{a,e}) \quad (2.2)$$

In Abschnitt 2.1.2.1 wird auf den U-Wert und dessen Bedeutung detaillierter eingegangen. Die Wärmespeicherung ist bei stationärer Betrachtung nicht darstellbar, da sie grundsätzlich ein instationärer Prozess ist.

**Konvektion:** In Gasen und Flüssigkeiten erfolgt der Wärmetransport zusätzlich zur Wärmeleitung durch die Fortbewegung der Moleküle innerhalb des zur Verfügung stehenden Raumes, wobei diese ihren Energieinhalt mit sich führen. Die Strömungen innerhalb der Gase oder Flüssigkeiten können entweder durch örtliche Temperatur- (thermischer Auftrieb), Dichte- bzw. Druckunterschiede (Wind) oder durch mechanische Hilfsmittel wie Ventilatoren und dergleichen verursacht werden. Im ersten Fall handelt es sich um eine freie oder natürliche, im zweiten Fall um eine erzwungene Konvektion.

**Wärmestrahlung:** Jeder Körper emittiert elektromagnetische Strahlung, deren Intensität und spektrale Energieverteilung von seiner Temperatur und Oberflächenbeschaffenheit abhängt und kann solche auch absorbieren. Da die Temperatur hierbei die entscheidende Einflussgröße ist, spricht man auch von Temperaturstrahlung. Die Ausbreitung der Strahlung ist nicht an Materie gebunden und deshalb auch im Vakuum möglich.

Die von einem Körper ausgestrahlte Intensität wird durch die Temperatur  $\theta$  und den Strahlungseigenschaften der Oberfläche bestimmt. Einen Körper, der bei der Temperatur  $\theta$  die höchstmögliche flächenbezogene Strahlungsleistung abstrahlt, bezeichnet man als einen „schwarzen Strahler“ (oder „schwarzen Körper“). Der ideale schwarze Strahler hat einen Emissionsgrad von  $\varepsilon = 1$ . Schwarze Strahler treten in der Realität nicht auf. Vereinfachend wird mit „grauen Strahlern“ gerechnet

und die Wärmestromdichte nach Gleichung 2.3, mit einem der strahlenden Oberfläche zugeordneten Emissionsgrad  $\varepsilon$ , reduziert.  $\sigma$  stellt in der Gleichung die Stefan-Boltzmann-Konstante und  $T$  die absolute Temperatur dar.

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.3)$$

Strahlung, die auf die Oberfläche eines Körpers auftrifft, kann reflektiert, absorbiert oder bei transparenten Stoffen durchgelassen werden. Diese Eigenschaften sind jeweils von der Wellenlänge der einfallenden Strahlung abhängig. Zur Vereinfachung der Rechenverfahren wird bei üblichen bauphysikalischen Berechnungen mit effektiven Emissionsgraden, effektiven Absorptionsgraden und effektiven Transmissionsgraden gerechnet. Bei der Berechnung der sommerlichen Raumtemperaturen wird zumindest zwischen kurzweiliger und langweiliger Strahlung unterschieden. In der Regel wird nicht die gesamte auftreffende Strahlung reflektiert, sondern nur ein Bruchteil, der durch den Reflexionsgrad  $\rho$  gekennzeichnet wird:

$$\rho = \frac{\text{reflektierte Strahlung}}{\text{auftreffende Strahlung}} \quad (2.4)$$

Der nichtreflektierte Teil der auftreffenden Strahlung kann den Körper passieren, wenn er aus einem strahlungsdurchlässigen Material besteht oder von ihm absorbiert wird. Die Absorptionsfähigkeit der Materialfläche wird durch den Absorptionsgrad  $a$  ausgedrückt:

$$a = \frac{\text{absorbierte Strahlung}}{\text{auftreffende Strahlung}} \quad (2.5)$$

Als Transmissionsgrad  $\tau$  bezeichnet man den Anteil an durchgelassener Strahlung. Der Transmissionsgrad für Wärmestrahlung liegt für fast alle Materialien faktisch bei Null.

$$\tau = \frac{\text{durchgelassene Strahlung}}{\text{auftreffende Strahlung}} \quad (2.6)$$

Zwischen diesen drei Größen besteht die Beziehung:

$$\rho + a + \tau = 1 \quad (2.7)$$

Der Emissionsgrad  $\varepsilon$  ist charakteristisch für jeden Strahler eine Funktion der Temperatur.  $\varepsilon$  ist kein reiner Stoffwert, sondern wird auch von der Oberflächenbeschaffenheit (glänzend, matt) beeinflusst. Die im Bereich des Bauwesens zu erwartenden Strahlertemperaturen sind in

der Regel nicht höher als 100 °C. Bei diesen niedrigen Strahlertemperaturen kann man eine grobe Einteilung in zwei Gruppen unterschiedlicher Oberflächen vornehmen. Man kann zwischen Metallflächen mit einem mittleren Emissionsgrad  $\varepsilon$  von ca. 0,05 und nichtmetallischen Oberflächen mit einem mittleren Emissionsgrad  $\varepsilon$  von ca. 0,9 unterscheiden. Jeder Temperaturstrahler kann über seine Oberfläche sowohl Strahlung emittieren als auch absorbieren. Nach dem Kirchhoffschen Gesetz ist der Emissionsgrad  $\varepsilon$  der Oberfläche des Strahlers bei jeder Temperatur und für jede Wellenlänge gleich dem Absorptionsgrad  $a$  der Oberfläche. Die ÖNorm B 8110-3 gibt diesbezüglich folgende Vorgaben: Für die langwellige Zu- und Abstrahlung ist für die Außenseite der opaken Außenbauteile jener der äußeren Oberfläche entsprechende Emissionsgrad für langwellige Strahlung anzusetzen. Ist der Emissionsgrad nicht bekannt, so ist der Wert 0,93 zu verwenden. Für die kurzwellige Zu- und Abstrahlung ist für die Außenseite der opaken Außenbauteile jener der äußeren Oberfläche entsprechende Absorptionsgrad für kurzwellige Strahlung anzusetzen. Ist der Absorptionsgrad nicht bekannt, ist der Wert 0,5 zu verwenden.

**Wärmeübergang:** Findet ein Wärmeaustausch zwischen einem Fluid (z. B. Luft) und einer angrenzenden, festen Oberfläche statt, bezeichnet man diesen Vorgang als Wärmeübergang. Im Bereich des baulichen Wärmeschutzes muss der Wärmeübergang von der Luft zum Bauteil, bzw. umgekehrt, in die Berechnungen miteinbezogen werden. Die Übertragungsvorgänge sind relativ kompliziert und mathematisch nicht einfach zu erfassen. Für die praktische Anwendung wurde deshalb ein Wärmeübergangskoeffizient definiert, dessen Ansatz bereits auf Newton zurückgeht. Der Wärmeübergangskoeffizient  $h$  ist kein Stoffwert, denn er ist abhängig von mehreren veränderlichen Parametern wie Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit, Oberflächenbeschaffenheit, geometrischen Verhältnissen, etc. Er ist die Summe aus dem konvektiven Anteil  $h_c$  und dem Strahlungsanteil  $h_r$  – der Wärmeleitungsanteil wird aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit der Luft vernachlässigt (Formel 2.8). Die Wärmestromdichte ergibt sich dann nach Formel 2.9.

$$h = h_r + h_c \quad (2.8)$$

$$q = h \cdot (\Theta_{\text{Oberflaeche}} - \Theta_{\text{Medium}}) \quad (2.9)$$

Die ÖNorm EN ISO 6946 [98] bietet ein vereinfachtes Rechenverfahren zur Ermittlung von  $h_r$  und  $h_c$ , wobei  $h_r$  nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz aus dem Wärmeübergangskoeffizienten aufgrund

Strahlung des schwarzen Körpers und dem Emissionsgrad des jeweiligen Oberflächenmaterials berechnet wird.  $h_c$  ist abhängig von der räumlichen Orientierung des Wärmestroms, sowie bei außenliegenden Oberflächen von der Windgeschwindigkeit. Der Kehrwert  $1/h$  ist laut Norm der Wärmeübergangswiderstand  $R_s$ . Auch die ÖNorm EN ISO 13791 [93] – im Kontext dieser Arbeit wichtig – verweist auf die ÖNorm EN ISO 6946 und gibt für  $h_{c,e}$  die Berechnung nach Formel 2.10 und  $h_{c,i}$  folgend vor: Bei einer vertikalen Wand  $2,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , bei aufwärts gerichtetem Wärmestrom  $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  und bei abwärts gerichtetem Wärmestrom  $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

$$h_{c,e} = 4 + 4 \cdot v \quad (2.10)$$

### 2.1.1.3 Temperatur

Die SI-Einheit<sup>2</sup> der physikalischen Größe Temperatur ist K, wobei in Österreich, Deutschland und der Schweiz die Einheit °C gebräuchlich und auch zulässig ist. Im Zusammenhang zur Berechnung der sommerlichen Überwärmung sind die Begriffe Lufttemperatur, (mittlere) Strahlungstemperatur und für den normgerechten Nachweis die sich aus den beiden Größen ergebende operative Temperatur von Bedeutung.

Die Lufttemperatur ist nach Normdefinition [84] die Temperatur der den Menschen umgebenden Luft. Strahlungstemperatur wird dabei vernachlässigt.

Die Strahlungstemperatur eines Bauteils entspricht dessen Oberflächentemperatur. Die mittlere Strahlungstemperatur ist nach Norm [84] die gleichmäßige Temperatur eines gedachten Hüllraumes, in dem die strahlungsbedingte Wärmeübertragung vom menschlichen Körper weg ebenso groß ist wie in dem realen, inhomogenen Hüllraum. In der Gebäudesimulation werden die Strahlungstemperaturen meist flächengewichtet berechnet, teilweise auch genauer über Sichtfaktoren, womit die Position der Person im Raum berücksichtigt werden kann.

Die operative Temperatur  $\theta_{op}$  ist nach Definition der ÖNorm B 8110-3 [92] die gleichmäßige Temperatur eines imaginären schwarzen Raumes, in dem eine Person die gleiche Wärmemenge durch Strahlung und Konvektion austauschen würde wie in der bestehenden nicht gleichmäßigen Umgebung. Die operative Temperatur ist demnach eine fiktive Größe, die als Mittelwert zwischen der Raumlufttemperatur und der mittleren Temperatur aller inneren Oberflächen des Raumes rechnerisch ermittelt wird. Sie bildet damit die von Menschen empfundene

<sup>2</sup>SI: frz. Système international d'unités

Temperatur besser ab, als die reine Lufttemperatur im Innenraum.

### 2.1.2 Weitere Kenngrößen

Es wird immer wieder versucht, das thermische Verhalten einer Baukonstruktion oder der gesamten Gebäudehülle durch Angabe einzelner Kenngrößen zu charakterisieren. Dass dies nie befriedigend umgesetzt werden kann, zeigt sich an immer wieder auftretenden Diskussionen um die Wertigkeit einzelner Kenngrößen. In diesem Zusammenhang sei besonders auf die Diskussion der Bedeutung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) hingewiesen – oder auch Kenngrößen zur Wärmespeicherung, die in Abschnitt 2.4 beleuchtet werden.

Hier soll in der Folge dieses Thema kurz aufgegriffen, diskutiert und analysiert werden. Vereinfachend wird dabei angenommen, dass der interessierende Bauteil plattenförmig<sup>3</sup> und aus homogenen Schichten zusammengesetzt ist. Damit kann dieser mit dem Modell eindimensionaler Wärmeleitung beschrieben werden. Zudem wird einschränkend angenommen, dass die zeitlichen Veränderungen von Einflüssen, die auf den Bauteil einwirken, sich periodisch nach einer gewissen Zeitspanne – der Periodenlänge – wiederholen. Diese Einflüsse werden im Folgenden „Randbedingungen“ genannt.

An der Außenseite des plattenförmigen Bauteils treten als wichtige Randbedingungen die Außenlufttemperatur, die Sonneneinstrahlung und der langwellige Strahlungsaustausch zwischen der Bauteiloberfläche, dem Himmel und der terrestrischen Umgebung auf. An der Innenseite wirken sich die Innenlufttemperatur, aber auch nutzungsbedingte Innenwärmen, die durch die Personenbelegung, Beleuchtung und Geräte, aber auch die Heizung und die Sonneneinstrahlung durch die Fenster entstehen, auf das thermische Verhalten des Bauteils aus. Aus physikalischer Sicht wird das thermische Verhalten einerseits durch die auf beiden Seiten des Bauteils angenommenen Lufttemperaturverläufe bestimmt. Andererseits generieren die anderen Randbedingungen sowohl auf der Innen- als auch auf der Außenseite des Bauteils Wärmequellen, die sich natürlich auch auf das thermische Verhalten des Bauteils auswirken. Beide Effekte können nach der periodisch eingeschwungenen Theorie gesondert behandelt und in ihrer Wirkung superponiert<sup>4</sup> werden.

Als zentrale Formel der in [63] dargestellten Theorie der harmonischen thermischen Leitwerte (siehe Abschnitt 2.7.2.2) wird der Zusammenhang zwischen der komplexen Amplitude<sup>5</sup> des Wärmeverlusts  $\hat{\Phi}_i$

<sup>3</sup>In der EN ISO 13786 [97] werden plattenförmige, als ebene Bauteile bezeichnet.

<sup>4</sup>superponieren = überlagern.

<sup>5</sup>Komplexwertige Amplituden werden hier durch Zirkumflexe über dem Symbol ge-



eines mit dem Index  $i$  gekennzeichneten Raumes und den komplexen Amplituden der Lufttemperatur  $\hat{\Theta}_j$  aller an den Raum  $i$  angrenzenden Räume gemäß

$$\hat{\Phi}_i = - \sum_j \tilde{L}_{i,j} \cdot \hat{\Theta}_j \quad (2.11)$$

dargestellt. Zu summieren ist in Gleichung 2.11 über alle angrenzenden Innen- als auch Außenräume. Verschiedene Außenräume ergeben sich dann, wenn zur Beschreibung der Wärmebilanz an der Bauteilaußenseite das Konzept der Strahlungslufttemperatur [57] verwendet wird.

Gleichung 2.11 gilt für Baukonstruktionen beliebiger Form und beliebiger Zusammensetzung, soll hier aber auf den Spezialfall eines plattenförmigen Bauteils angewendet werden. In diesem Fall wird nur zwischen zwei Räumen unterschieden, die mit den Indizes  $i$  für „innen“ und  $e$  für „außen“ bezeichnet werden sollen. Zudem ist im Fall eindimensionaler Wärmeleitung eine Flächenzuordnung eindeutig möglich, sodass die harmonischen thermischen Leitwerte<sup>6</sup>  $\tilde{L}$  aus Gleichung 2.11 über die Beziehung

$$\tilde{L} = \tilde{Y} \cdot A \quad (2.12)$$

mit den flächenbezogenen harmonischen Leitwerten  $\tilde{Y}$  der internationalen Norm EN ISO 13786 [97] in Verbindung gebracht werden können.  $A$  in Gleichung 2.12 ist die Fläche des plattenförmigen Bauteils.

Für den Spezialfall des plattenförmigen Bauteils nimmt Gleichung 2.11 die einfache Form

$$\hat{\Phi}_i = -(\tilde{Y}_{i,i} \cdot \hat{\Theta}_i + \tilde{Y}_{i,e} \cdot \hat{\Theta}_e) \cdot A \quad (2.13)$$

an. Wird – wie bei eindimensionaler Berechnung üblich und sinnvoll – flächenbezogen gerechnet, so ergibt sich als Beziehung zwischen der komplexen Amplitude des aus dem Innenraum durch den Bauteil entweichenden flächenbezogenen Wärmestromes  $\hat{q}_i$  – d. h. der Wärmestromdichte – und den komplexen Amplituden der Innenlufttemperatur  $\hat{\Theta}_i$  und der Außenlufttemperatur  $\hat{\Theta}_e$  folgende Gleichung 2.14.

$$\hat{q}_i = \frac{\hat{\Phi}_i}{A} = -(\tilde{Y}_{i,i} \cdot \hat{\Theta}_i + \tilde{Y}_{i,e} \cdot \hat{\Theta}_e) \quad (2.14)$$

kennzeichnet. Siehe auch Abschnitt 2.7.2.2.

<sup>6</sup>Komplexwertige Kenngrößen, wie z. B. die harmonischen thermischen Leitwerte werden hier durch Tilden über dem Symbol gekennzeichnet.

Gleichung 2.14 gilt für jede Harmonische und somit auch für die nullte Harmonische, d.h. die stationäre Berechnung. Bei der stationären Berechnung treten die Mittelwerte über die jeweilige Periode an die Stelle der komplexen Amplituden. Da auch die Leitwerte in diesem Fall reelle Größen sind, hat für die nullte Harmonische Gleichung 2.14 keine komplexe sondern nur reelle Koeffizienten.

### 2.1.2.1 U-Wert

Nur im stationären Fall muss (bei Abwesenheit von Wärmequellen im Bauteil) aufgrund der Energieerhaltung der Wärmezuffluss in den Bauteil genauso groß sein wie der Wärmeabfluss. Um dies bei beliebigen Randbedingungen zu gewährleisten, muss gemäß [46] allgemein die Beziehung

$$\sum_j L_{i,j} = 0 \quad (2.15)$$

erfüllt sein. Im Spezialfall des plattenförmigen Bauteils bedeutet dies, dass

$$Y_{i,i} = -Y_{i,e} \quad (2.16)$$

gelten muss. Für die nullte Harmonische erhält die Gleichung 2.14 daher folgende Form

$$\bar{q}_i = -Y_{i,i} \cdot \bar{\Theta}_i - Y_{i,e} \cdot \bar{\Theta}_e = Y_{i,e} \cdot (\bar{\Theta}_i - \bar{\Theta}_e) = U \cdot (\bar{\Theta}_i - \bar{\Theta}_e) \quad (2.17)$$

Der Mittelwert der von innen in den Bauteil eintretenden Wärmestromdichte  $\bar{q}_i$  ist somit proportional zur Differenz der Mittelwerte von Innen- und Außenlufttemperatur ( $\bar{\Theta}_i - \bar{\Theta}_e$ ). Als Proportionalitätsfaktor tritt der flächenbezogene Leitwert  $Y_{i,e}$  auf, der unschwer mit dem Wärmedurchgangskoeffizienten  $U$  identifiziert werden kann. Für die stationäre Rechnung nimmt somit der Wärmedurchgangskoeffizient als Kenngröße eine zentrale Rolle ein.

Kurz soll auch auf den sogenannten „effektiven U-Wert“, der nach wie vor gerne verwendet wird, eingegangen werden. Die Einführung dieser Kenngröße wird oft mit der Behauptung verknüpft, dass der U-Wert die realen Verhältnisse nicht richtig wiedergeben könne, da er den Einfluss der Sonneneinstrahlung nicht berücksichtigt. Einerseits ist es richtig, dass der U-Wert ein flächenbezogener Leitwert ist, der gemäß Gleichung 2.17 die mittlere Wärmestromdichte mit der Differenz der mittleren Lufttemperaturen der an den plattenförmigen Bauteil

angrenzenden beiden Räume verknüpft. Andererseits wird die Auswirkung der Wärmequellen an den Bauteiloberflächen durch den U-Wert nicht erfasst, kann (und muss) aber gesondert ermittelt werden.

Im Gegensatz zum U-Wert sind in Hinblick auf das instationäre Verhalten, das ja auch die Wärmespeicherung berücksichtigt, verschiedenste Kenngrößen im Einsatz. Gemein ist den meisten diesen Kenngrößen, dass sie sich unmittelbar aus Gleichung 2.14 ableiten lassen. Als Beispiele für solche Kenngrößen seien im Folgenden die Kenngrößen „Temperaturamplitudendämpfung“ und „Temperaturdurchgriffskoeffizient“ kurz durchdiskutiert.

Den dynamischen thermischen Kenngrößen wird üblicherweise die Tagesperiode zugrunde gelegt und die Betrachtung auf die erste Harmonische, also rein sinusförmige Verläufe beschränkt. Die Gleichung 2.14 wird dabei insofern vereinfacht, indem entweder ein Temperaturverlauf oder die Wärmestromdichte zeitunabhängig, also konstant angesetzt wird. In diesem Fall ist die entsprechende komplexe Amplitude identisch Null.

### 2.1.2.2 Temperaturamplitudendämpfung

Im Fall der Temperaturamplitudendämpfung wird angenommen, dass die Wärmestromdichte an der Innenseite des Bauteils zeitunabhängig ist (wohl aber einen konstanten Wert annehmen kann). Es gilt damit  $\hat{q}_i = 0$  und gemäß Gleichung 2.14.

$$0 = \tilde{Y}_{i,i} \cdot \hat{\Theta}_i - \tilde{Y}_{i,e} \cdot \hat{\Theta}_e \quad (2.18)$$

Um auf eine reelle Kenngröße zu kommen, wird nur auf die Beträge Bezug genommen und damit die Information über die Phasenlagen eliminiert. Das dimensionslose Verhältnis  $\frac{|\hat{\Theta}_e|}{|\hat{\Theta}_i|}$  wird gemäß [43] als „Temperaturamplitudendämpfung“ bezeichnet. Gemäß Gleichung 2.18 berechnet sich diese wie folgt:

$$\frac{|\hat{\Theta}_e|}{|\hat{\Theta}_i|} = \frac{|\tilde{Y}_{i,i}|}{|\tilde{Y}_{i,e}|} \quad (2.19)$$

Mit der Temperaturamplitudendämpfung wird somit die Amplitude der (sinusförmig angenommenen) Tagesschwankung der Temperatur an der Außenseite eines plattenförmigen Bauteils auf die an der Innenseite auftretende Tagesschwankung bezogen. Sie wird umso größer, je stärker die Temperaturschwankung beim Durchgang durch den Bauteil gedämpft wird. In [56] wird der Reziprokwert der Temperaturamplitudendämpfung unter dem Namen „Temperaturdurchgriffskoeffizient II“ (TDGII) eingeführt.

### 2.1.2.3 Temperaturdurchgriffskoeffizient I

Der Temperaturdurchgriffskoeffizient I (TDGI) wurde in [56] eingeführt und ist insofern von besonderer Bedeutung als er landläufig „dynamischer U-Wert“ genannt und oft verwendet wird. Dieser Kenngröße liegt die Annahme zugrunde, dass die Innenlufttemperatur zeitunabhängig, also konstant ist und die Außenlufttemperatur schwankt. Mit  $\hat{\Theta}_i = 0$  nimmt die Gleichung 2.14 die Form

$$\hat{q}_i = -\tilde{Y}_{i,e} \cdot \hat{\Theta}_e \quad (2.20)$$

an. Schwankt nun die Temperatur an der Außenseite des Bauteils mit der Amplitude  $\hat{\Theta}_e$ , so bewirkt diese bei konstant gehaltener Innenlufttemperatur eine Schwankung der an der Innenseite registrierten Wärmestromdichte mit dem Betrag von  $|\hat{q}_i|$ . Das Verhältnis  $\frac{|\hat{q}_i|}{\hat{\Theta}_e}$  wird nach [56] „Temperaturdurchgriffskoeffizient I“ genannt und hat die Dimension eines flächenbezogenen Leitwertes. Dies mag der Grund sein, dass diese Größe gerne auch „dynamischer U-Wert“ genannt wird.

Die Berechnungsformel für den TDGI ergibt sich unmittelbar aus Gleichung 2.20 zu

$$\frac{|\hat{q}_i|}{|\hat{\Theta}_e|} = |\tilde{Y}_{i,e}| \quad (2.21)$$

Bei nach heutigen Vorschriften gedämmten Außenwänden ist der TDGI eine sehr kleine Größe. Dies bedeutet, dass eine Schwankung der Außenlufttemperatur nur eine sehr kleine Schwankung der Wärmestromdichte an der Innenseite der Wand zur Folge hat. Es bedeutet jedoch nicht, dass die Wärmestromdichte an der Innenseite der Wand verschwindet. Die Wärmestromdichte schwankt im Tagesverlauf nur gering um ihren Mittelwert, der durch Gleichung 2.17 und damit durch den Wärmedurchgangskoeffizienten U gegeben ist.

Der TDGI ist der Betrag der nach der ÖNorm EN ISO 13786 bezeichneten „dynamischen Wärmeaufnahme“  $\tilde{Y}_{i,e}$ . Quantitativ ergibt diese beispielhaft bei einer 20 cm STB-Wand mit EPS-Außendämmung und einem stationären U-Wert der Konstruktion von  $0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  etwa  $0,07 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , bei Erhöhung der Dämmung hin zu Passivhausstandard und somit einem stationären U-Wert von  $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  ergibt sich ein TDGI von  $0,026 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Abhängig von Material und Aufbau ändert sich der TDGI, bei einer 10 cm Massivholzwand mit EPS-Außendämmung und einem stationären U-Wert von  $0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  ergibt der TDGI  $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , bei Erhöhung der Dämmung hin zu Passivhausstandard ergibt der TDGI etwa eine Schwankung von  $0,06 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  um den stationären U-Wert von  $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

Die oft geübte Praxis, den dynamischen U-Wert als eigentlich wesentliche Größe herauszustreichen und gleichzeitig die Bedeutung des stationären U-Wertes herunter zu spielen oder sogar zu ignorieren, stellt sich vor diesem Hintergrund als unsinnig heraus und führt zu Fehleinschätzungen sowie falschen Planungsempfehlungen.

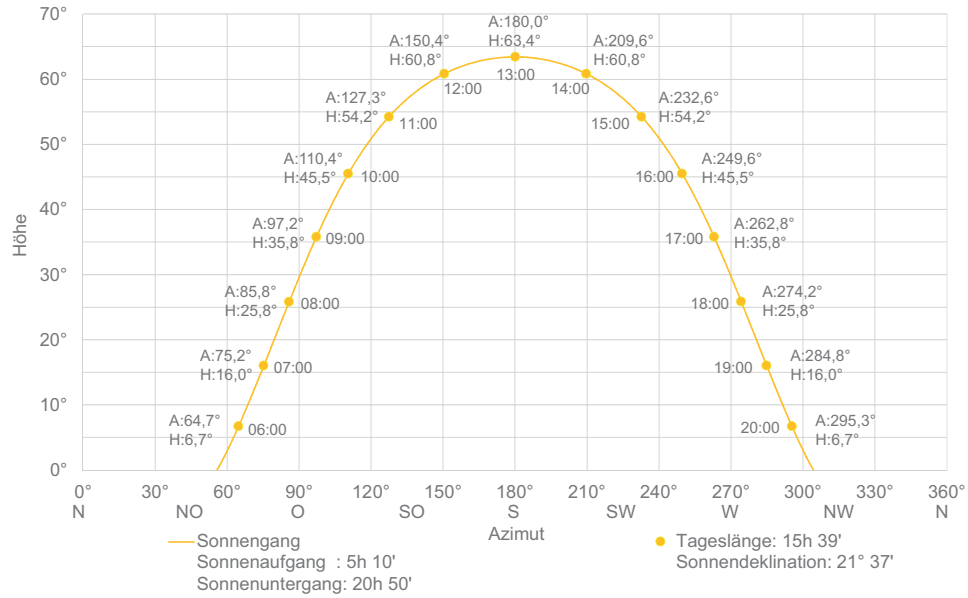
## 2.2 Sonnenbahn und Solarstrahlung

Die Sonnenbahn ist die von einem Betrachtungspunkt der Erdoberfläche aus gesehene, scheinbare Bahn der Sonne. Sie ist abhängig von der geografischen Breite des Betrachtungspunktes und dem Zeitpunkt der Beobachtung. Die Position relativ zu einem terrestrischen Beobachtungspunkt ergibt sich aus dem Umlauf der Erde um die Sonne und der Rotation der Erde um ihre zur Ekliptik um  $23,44^\circ$  geneigte Achse. Sie wird beschrieben durch die Sonnenhöhe und das Sonnenazimut (vgl. [41]). Abbildung 2.2 zeigt in herkömmlicher Weise und Abbildung 2.3 in dreidimensionaler Darstellung exemplarisch den Sonnengang am 15. Juli, der normgerecht für die Berechnung des sommerlichen Wärmeschutzes angesetzt wird, für den Standort Wien, Innere Stadt. Der Sonnenhöchststand erreicht dabei im Süden  $68,3^\circ$ , der vergleichsweise Höchststand am 21. Dezember am selben Standort beträgt  $16,8^\circ$ . Diese Gegebenheit erlaubt in unseren Breiten sehr einfache und wirksame Verschattung südorientierter transparenter Gebäudeflächen durch fixe horizontale Auskragungen über den Glasflächen. Gleichzeitig erlaubt es bei richtiger Dimensionierung durch die flach einfallende Direktstrahlung im Winter gewünschte solare Wärmeeinträge. Sonnenschutzmaßnahmen sind ostseitig und westseitig eines Gebäudes bei flach einfallender Strahlung weitaus schwieriger handzuhaben – mit fixen Verschattungselementen schlicht unmöglich. Zudem sind im Sommer die Strahlungsflüsse aus Ost und West größer als jene aus Süden. Für sommerlichen Wärmeschutz sind aufgrund des hohen Strahlungsflusses aus Richtung des Zenit besonders horizontale Glasflächen kritisch, wie in Abbildung 2.4 ersichtlich.

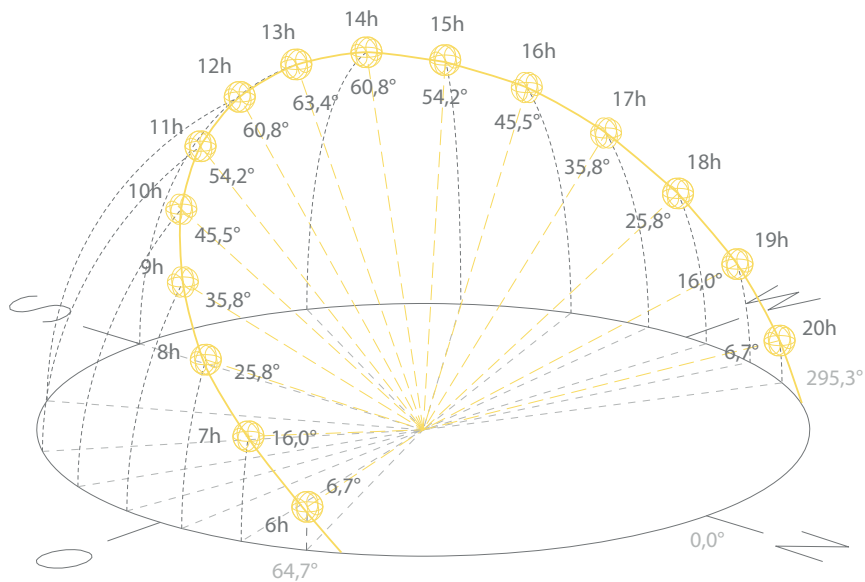
Das Strahlungsspektrum der für das Bauwesen relevanten Sonneneinstrahlung auf der Erde unterteilt man in der Regel in die drei folgenden Wellenlängenbereiche [112]:

- Ultraviolette (UV) Strahlung von 0 bis 380 nm Wellenlänge.
- Sichtbare Strahlung auf die das menschliche Auge reagiert mit Wellenlängen von 380 bis 780 nm.
- Wärmestrahlung des nahen Infrarot von 780 bis 2800 nm.

Das Sonnenspektrum an der Erdoberfläche verteilt sich an einem



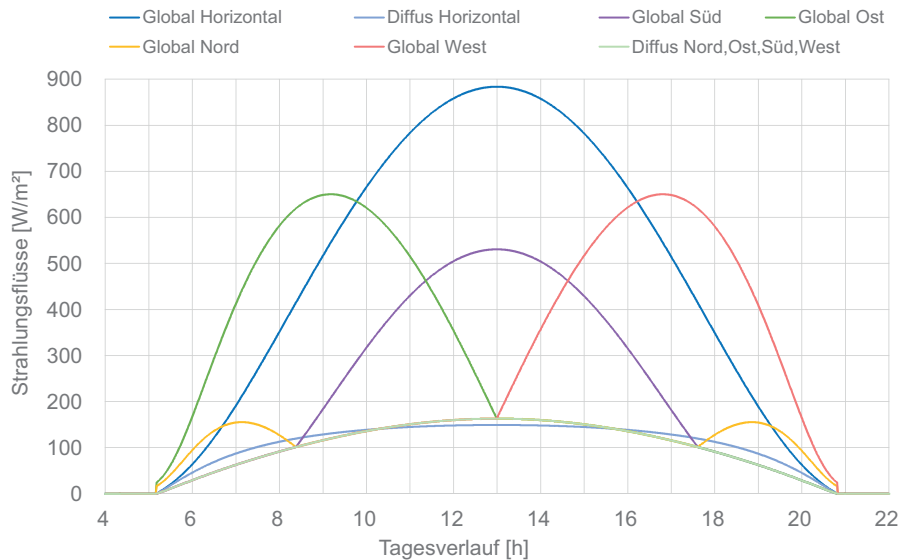
**Abbildung 2.2:** Sonnengang für den Standort Wien, Innere Stadt am 15. Juli. Meridian der Zeitzone: 30° O. Berechnet mit SolRad [61].



**Abbildung 2.3:** Sonnengang für den Standort Wien, Innere Stadt am 15. Juli. Meridian der Zeitzone: 30° O. Berechnet mit SolRad [61], visualisiert mit AutoCad.

klaren Tag mit etwa 47 % im sichtbaren Bereich, mit 46 % im Bereich der Wärmestrahlung und mit 7 % UV-Anteil. Die integrale Strahlungssumme außerhalb der Erdatmosphäre ergibt als durchschnittlichen Wert die sogenannte Solarkonstante von  $1366 \text{ W/m}^2$ . Von den extraterrestrisch einfallenden Strahlungen treffen aber maximal  $1100 \text{ W/m}^2$  auf die Erdoberfläche. Ein Teil der Sonnenstrahlung wird zurück in den Weltraum reflektiert, ein anderer durch Absorption an Ozon, Kohlendioxid und Wasserdampf in der Atmosphäre in Wärme umgewandelt (atmosphärische Gegenstrahlung). Ein Teil der einfallenden Strahlung wird an Partikeln und Luftmolekülen gestreut und trifft als Diffusstrahlung auf die Erdoberfläche (Himmelsstrahlung). Vgl. zu diesem Absatz [112], [106].

Die Schwächung der direkten Sonnenstrahlung beim Durchtritt durch die Erdatmosphäre hängt zum einen von der Weglänge der Strahlung durch die Atmosphäre und damit von Datum, Uhrzeit, geografischer Lage und Seehöhe des Gebäudestandortes ab. Zum anderen wird die Schwächung durch den Trübungsstatus der Atmosphäre, der sich aus dem Grad der Bewölkung und aus der Luftverschmutzung am Gebäudestandort ergibt, beeinflusst – beschreibbar durch den Trübungsfaktor nach Linke. Für den Sommertauglichkeitsnachweis nach ÖNorm B 8110-3 ist der Linkesche Trübungsfaktor auf den Wert 4,5 zu setzen. Dies entspricht einem Strahlungstag – d. h. einem unbewölkten, klaren Tag – in dicht verbauten Gebieten. Der Diffusstrahlungsfaktor nach Reitz gibt jenen Anteil, der beim Durchgang durch die Atmosphäre „verloren gegangenen“ Strahlung an, der aufgrund von Streueffekten in der Atmosphäre als diffuse Himmelsstrahlung die Erdoberfläche erreicht. Er liegt zwischen 0,0 und 1,0. Bei vollständigem, mit dunklen Gewitterwolken bedecktem Himmel kann der Reitzsche Faktor Werte unter 0,1 annehmen; es ist fast dunkel. Andererseits kann bei hochnebelartiger Bewölkung der Reitz-Faktor bis auf über 0,8 ansteigen; trotz fehlender Direktstrahlung ist es sehr hell. Durch Analyse von Messreihen der Direkt- und Himmelsstrahlung konnte gezeigt werden, dass der Reitzsche Diffusstrahlungsfaktor an Strahlungstagen, also bei klarem, unbewölktem Wetter, bei  $1/3$  liegt – das ist auch der Wert, der nach ÖNorm B 8110-3 für den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes angesetzt werden muss. Die Albedo ist jener Anteil der auf die Erdoberfläche auftreffenden Globalstrahlung, der von dieser diffus reflektiert wird. Die Albedo kann bei dunklen Oberflächen (z. B. bei dunklem Asphalt) Werte unter 0,1, bei hellen Oberflächen, wie z. B. bei Schneelage oder in Wüstengebieten mit hellem Sand, Werte um 0,5 annehmen. Für den Sommertauglichkeitsnachweis nach ÖNorm B 8110-3 ist die Albedo auf den Wert 0,2 zu setzen. Dies entspricht in



**Abbildung 2.4:** Strahlungsflüsse für den Standort Wien, Innere Stadt am 15. Juli. Trübungsfaktor nach Linke: 4,5. Diffusstrahlungsfaktor nach Reitz: 0,33. Albedo 0,2. Anteilfaktor für Himmelsstrahlung: 0,5. Meridian der Zeitzone: 30° O. Berechnet mit SolRad [61].

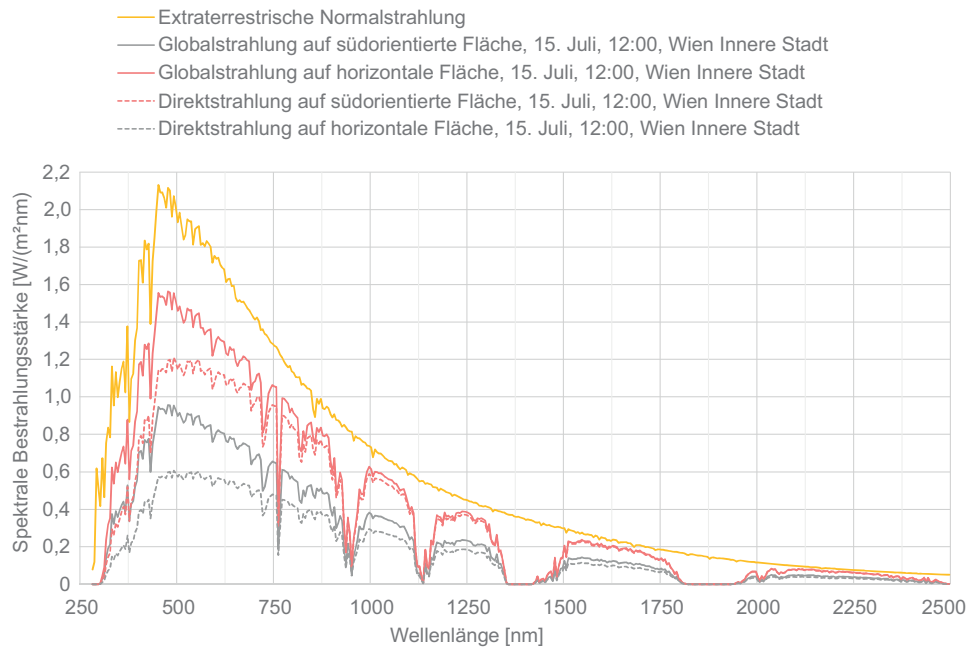
etwa dem Reflexionsvermögen einer Wiese. Vgl. zu diesem Absatz [68].

Die Summe aus Himmelsstrahlung und terrestrischer Reflexstrahlung ergibt die Diffusstrahlung. Die Summe aus Diffusstrahlung und Direktstrahlung nennt man Globalstrahlung [69]. Da für den normgemäßen Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes anhand der operativen Raumtemperaturen als Simulationstag der 15. Juli angesetzt wird, sollen für dieses Datum Strahlungsinformationen und Sonnengang exemplarisch für den Standort Wien, Innere Stadt (Breite: 48° 13', Länge: 16° 23', Seehöhe: 170 Meter) vorgestellt werden. Abbildung 2.4 zeigt die Strahlungsflüsse am 15. Juli auf Fassaden der vier Himmelsrichtungen sowie die Horizontale. Tabelle 2.1 listet die mittleren monatlichen Tagessummen auf entsprechende Flächen im Monat Juli, um ein Gefühl für die Größenordnung von entsprechenden solaren Einträgen zu erhalten. Vor allem über die transparente Gebäudehülle gelangt ein von Aufbau und Eigenschaften der Gläser abhängig großer Anteil (siehe Abschnitt 2.3) in den Innenraum und trägt zu erhöhten sommerlichen Raumtemperaturen bei. Bei immer höher werdenden thermischen Standards der opaken Bauteile (U-Wert von Bauteilen im Passivhausstandard  $\leq 0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) sind diese im Verhältnis zu den Einträgen über transparente Flächen verschwindend klein.

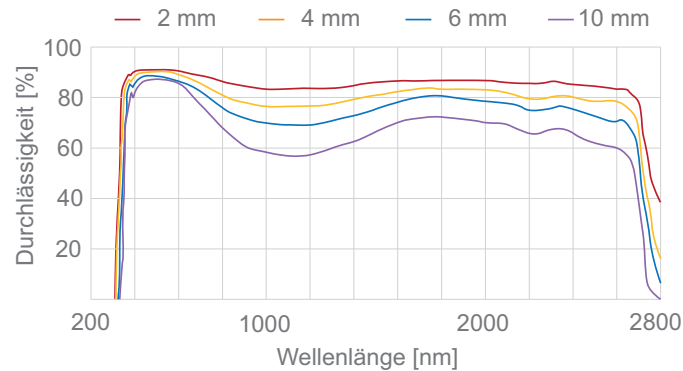


**Tabelle 2.1:** Mittlere monatliche Tagessummen für den Standort Wien, Innere Stadt von Global- und Diffusstrahlung  $\text{Wh/m}^2$  auf entsprechende Flächen im Juli. Berechnet mit dem Klimadatenrechner [71].

	Horizontal	Nord	Ost	Süd	West
Global	5.471,60	2.048,80	2.877,40	3.013,70	2.877,40
Himmel	2.906,10	2.000,20	2.000,20	2.000,20	2.000,20



**Abbildung 2.5:** Solarspektrum für den Standort Wien, Innere Stadt am 15. Juli, 12:00 Uhr. Berechnet mit Smarts 2.9.5 [36] (vgl. [41]). Verwendete Eingabeparameter: Luftdruck: 992 mbar, Seehöhe: 170 m, Lufttemperatur: 29,07 °C, relative Luftfeuchte: 38 %, Tagesmittel der Lufttemperatur: 33,07 °C, Saison: Sommer, Totale Ozonsäulenmenge: 0,326 cm, Verschmutzung: Light Pollution, Kohlendioxidkonzentration: 379 ppm, Extraterrestrisches Spektrum: Gueymard 2004, Aerosol Model: Urban, Trübung durch Aerosole (AOD500 nm): 0,21, Albedo: 0,2, Azimut 12:00: 180°, Neigung: 90°, Wellenlängebereich: 280-4000, Solarkonstante: 1366,1  $\text{W/m}^2$ . Mit SolRad [61] berechnete zugrunde gelegte Sonnenhöhe bei Azimut 180°, wahrer Ortszeit und 48°13' Breite und 16°23' Länge: 63,4°.

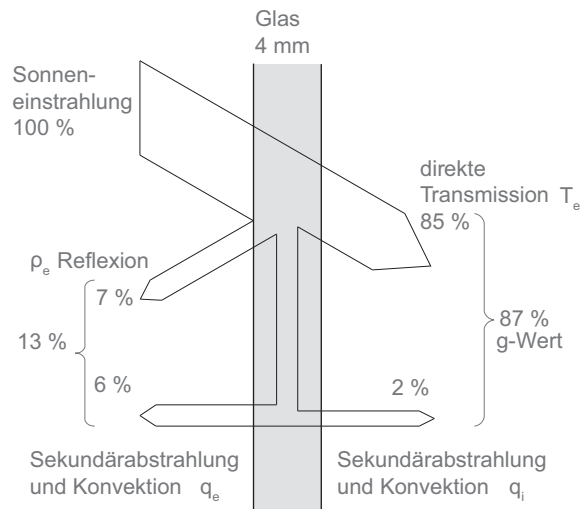


**Abbildung 2.6:** Die Kurven zeigen die Glaseigenschaften mit hoher Transmission im sichtbaren Bereich, reduzierter Transmission im nahen Infrarot(IR)-Bereich und einer Undurchlässigkeit im langwelligen IR-Bereich (vgl. [112]).

### 2.3 Wärmeübertragung und Strahlungsdurchgang bei Verglasungen

Bei den Eigenschaften von Glas ist besonders die Selektivität beim Strahlungsdurchgang hervorzuheben: Die spektrale Durchlässigkeit von Glas reicht für die Solarstrahlung von ca. 300 bis ca. 2500 nm. Undurchlässig ist Glas sowohl für den langwelligen Infrarot-Bereich oberhalb von 2500 nm als auch für den Strahlungsanteil des biologisch wirksamen UV-Lichts unterhalb von 315 nm [48] (siehe Abb. 2.6). Kurzwellige Solarstrahlung kann das Glas also zum Großteil passieren, während langwellige Wärmestrahlung reflektiert wird. Die in den Raum eingedrungene kurzwellige Strahlung wird an den inneren Raumboflächen absorbiert und in langwellige Strahlung umgewandelt. Die langwellige Strahlung kann folgend nicht mehr aus dem Raum gelangen, wodurch sich dieser aufheizt. Dieser Effekt wird landläufig als der Glashauss-Effekt bezeichnet. Die Nutzung dieses Effektes führte zusammen mit der Entwicklung der Ingenieurskunst zu den Palmenhäusern am Ende des 19. Jahrhunderts in Mitteleuropa (vgl. [112]) und weist offensichtlich darauf hin, dass die solaren Wärmeeinträge über die transparente Gebäudehülle eine der größten Herausforderung hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes darstellen.

Die auf die Außenseite einer transparenten Gebäudefläche auftreffende Solarstrahlung wird entweder durchgelassen (Transmission), zurückgestrahlt (Reflexion) oder im Glas aufgenommen und in Wärme umgewandelt (Absorption). Das erwärmte Glas gibt seine Energie über Wärmestrahlung und Konvektion wieder an seine Umgebung ab. Ab-



**Abbildung 2.7:** Energiebilanz bzgl. Sonnenstrahlung am Beispiel einer 4 mm Glasscheibe [112].

Abbildung 2.7 zeigt eine Energiebilanz am Beispiel einer 4 mm dicken Floatglasscheibe, bezogen auf den Bereich der Wellenlängen von 300 bis 2500 nm. Für alle drei Phänomene werden dimensionslose Kennzahlen definiert: der Reflexionsgrad  $\rho$ , der Absorptionsgrad  $\alpha$  und der Transmissionsgrad  $\tau$ , vgl. ÖNorm EN 410 – Glas im Bauwesen [91].

### 2.3.1 Gesamtenergiedurchlassgrad $g$

Der Gesamtenergiedurchlassgrad ( $g$ -Wert) ist jener Anteil, der auf die Außenseite des Glases auftreffenden Strahlung, der im Inneren als Heizleistung wirksam wird [69] und wird in Prozent ausgedrückt. Der  $g$ -Wert ist die Summe des direkten Strahlungstransmissionsgrades  $\tau_e$  und des sekundären Wärmeabgabegrades  $q_i$  der Verglasung nach innen, wiederum bezogen auf den Bereich der Wellenlängen von 300 bis 2500 nm (Abb. 2.7).

$$g = \tau_e + q_i \quad (2.22)$$

Zur Berechnung des Wärmeeintrages über Verglasungen ist der Einfallswinkel der Strahlung zu berücksichtigen. Der Gesamtenergiedurchlassgrad ist für senkrecht auf das Glas auftreffende Strahlung definiert. Bei schrägem Strahlungseinfall wird der Strahlungstransmissionsgrad kleiner.

Wie in Tabelle 2.2 ersichtlich, verringert sich bei Erhöhung der Scheibenanzahl der Verglasung sowohl der  $U$ -Wert (verbesserte Wär-

**Tabelle 2.2:** Richtwerte für transparente Bauteile – unbeschichtet und beschichtet nach ÖNorm B 8110-3 [92].

Unbeschichtet					
Scheiben	$U_g$	$\tau_{e,Licht}$	$\tau_{e,B}$	g	$\varepsilon$
1-fach	5,8	0,90	0,85	0,87	3,1
2-fach	2,8	0,81	0,72	0,75	2,3
3-fach	2,0	0,72	0,64	0,67	2,0
4-fach	1,5	0,63	0,55	0,60	2,0
Beschichtet					
Scheiben	$U_g$	$\tau_{e,Licht}$	$\tau_{e,B}$	g	$\varepsilon$
2-fach	1,1	0,8	0,55	0,65	2,5
2-fach	1,1	0,7	0,40	0,50	2,5
2-fach	1,1	0,6	0,30	0,35	3,0
2-fach	1,1	0,5	0,20	0,25	3,0
3-fach	0,7	0,7	0,45	0,50	1,5
3-fach	0,5	0,7	0,45	0,50	1,5
3-fach	0,7	0,5	0,20	0,25	2,0
3-fach	0,5	0,5	0,20	0,25	2,0

medämmwirkung), als auch der g-Wert (geringerer Durchlass von Solarstrahlung). Mit Sonnenschutzgläsern können g-Werte stark reduziert werden. Eine geeignete energetische Planung sollte eine der Ausrichtung und dem Außenklima angepasste Verglasungen berücksichtigen.

## 2.4 Wärmespeicherung von Baukonstruktionen

Die Wärmespeicherung von Baukonstruktionen ist ein vieldiskutiertes Thema hinsichtlich der sommerlichen Überwärmung von Räumen. Dennoch herrschen erfahrungsgemäß viele Unklarheiten und Missverständnisse vor, die in folgenden Erläuterungen beseitigt werden sollen. Zum Ersten soll geklärt werden, welche Parameter tatsächlich eine effektive oder wirksame Wärmespeicherfähigkeit von Konstruktionen beschreiben. Hierbei soll auf wesentliche Begriffe und die Berechnung und Auswertung von thermodynamischen Kennwerten eingegangen werden. Auch der Unterschied zwischen Kurz- und Langzeitspeicherung, d. h. der Einfluss der zugrundeliegenden zeitlichen Periode soll verdeutlicht

**Tabelle 2.3:** Wärmetechnische Kenngrößen für Beton, Ziegel und Holz nach ÖNorm B 8110-7 [96].

Bezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Massendichte [kgm <sup>-3</sup> ]	spez. Wärmekapazität [Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
Vollholz (Fichte)	0,12	475	1600
Vollziegel	0,66	1500	1000
Normalbeton	1,65	2200	1000

werden. Überdies soll veranschaulicht werden, warum eine reine Betrachtung auf Material- oder Bauteilebene für eine Beurteilung des sommerlichen Verhaltens eines Raumes nicht ausreichend ist. Über die theoretische Diskussion hinaus sollen für ein besseres Verständnis der Wärmespeicherung Ergebnisse von instationären, thermischen Bauteil- und Gebäudesimulationen sowohl grafisch als auch quantitativ dargestellt werden. Behandelt wird hier die Wärmespeicherfähigkeit von plattenförmigen Bauteilen (eindimensionaler Wärmestrom) mit typischen in der Baupraxis vorkommenden Materialien und Randbedingungen. Die Bauteile können somit als sensible Wärmespeicher angesehen werden – latente und thermochemische Speicher werden in diesem Grundlagenabschnitt nicht behandelt.

Grundsätzlich ist die Wärmespeicherfähigkeit eine thermodynamische Eigenschaft. Ersichtlich wird diese Eigenschaft erst bei sich zeitlich verändernden thermischen Randbedingungen wirksam. Im Bereich des Bauwesens lässt sich die Wärmespeicherung am einfachsten am Beispiel des zeitabhängigen (instationären) Wärmedurchgangs durch einen Bauteil, beispielsweise einer Außenwand, erläutern: Die Amplitude einer Temperaturwelle (z. B. äußere Oberflächentemperatur) wird während des Durchgangs durch einen Bauteil hin zum Innenraum gedämpft und zeitlich verschoben. Mit Zunahme der Wärmespeicherfähigkeit des Bauteils wird die Amplitude der inneren Oberflächentemperatur verringert, sprich Maxima und Minima in Richtung des Durchschnittswertes gedämpft. Zudem nimmt die Phasenverschiebung von der Außentemperaturwelle gegenüber der Innentemperaturwelle mit Zunahme der speicherwirksamen Masse des trennenden Bauteils zu.

Der beschriebene Effekt lässt sich sehr gut in Abb. 2.8 erkennen, wo Amplitudendämpfung und Phasenverschiebung einer 25 cm Betonwand, einer 25 cm Vollziegelwand, als auch einer gleich dicken Vollholzwand (Fichte) bei sich in der Tagesperiode ändernden thermischen Randbedingungen an der Außenseite gegenübergestellt werden. Die

Materialkennwerte sind in Tabelle 2.3 angegeben. In diesen Untersuchungen sind die Wärmeübergangswiderstände  $R_{si}$  und  $R_{se}$  wie auch in der ÖNorm B 8110-3 mit  $0 \text{ (m}^2\text{K)/W}$  festgelegt. Dabei ist aber zu beachten, dass der Vergleich allein dem Aufzeigen des Einflusses der Materialeigenschaften auf das thermische Verhalten einer homogenen Schicht dient, die Wärmedurchgangswiderstände der Betonwand, Ziegelwand und Holzwand sind trotz gleicher Dicke von 25 cm sehr unterschiedlich und keinesfalls thermisch normgerechte Außenwände ( $R_{\text{Beton}}=0,15$ ;  $R_{\text{Ziegel}}=0,38$ ;  $R_{\text{Holz}}=2,1 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ ). Sehr schön lässt sich damit aber demonstrieren, wie stark die Wärmeleitfähigkeit des Materials die Temperaturverteilung im Bauteil beeinflusst. Die naheliegende Erwartung, dass eine hohe Wärmespeicherfähigkeit automatisch zu einer starken Dämpfung der Temperaturschwankung im Bauteil führt, wird durch die hohe Wärmeleitfähigkeit des Betons (zumindest im Vergleich zum Holz) enttäuscht. Die Amplitudendämpfung findet sich für eine Bauteilschicht in der ÖNorm EN ISO 13786 als absoluter Betrag eines Elementes der Schichtmatrix, nämlich  $Z_{11}$  wieder und wird als Temperaturamplitudenfaktor (Formel 2.23) bezeichnet. Er ist bei der Holzwand klar ersichtlich ein Vielfaches gegenüber jenem der Betonwand, die Vollziegelwand ordnet sich bezüglich der Temperaturamplitudendämpfung zwischen den Materialien Beton und Holz ein. Der Kehrwert des Temperaturamplitudenfaktors ist das in der Literatur des Öfteren vorkommende Temperatur-Amplituden-Verhältnis (TAV). Die Temperaturamplitudendämpfung für einen gesamten, plattenförmigen Bauteil wird anhand Division des Betrags der Wärmeaufnahme innen durch die dynamische Wärmeaufnahme nach Formel 2.19 berechnet, erläutert in Abschnitt 2.1.2.2.

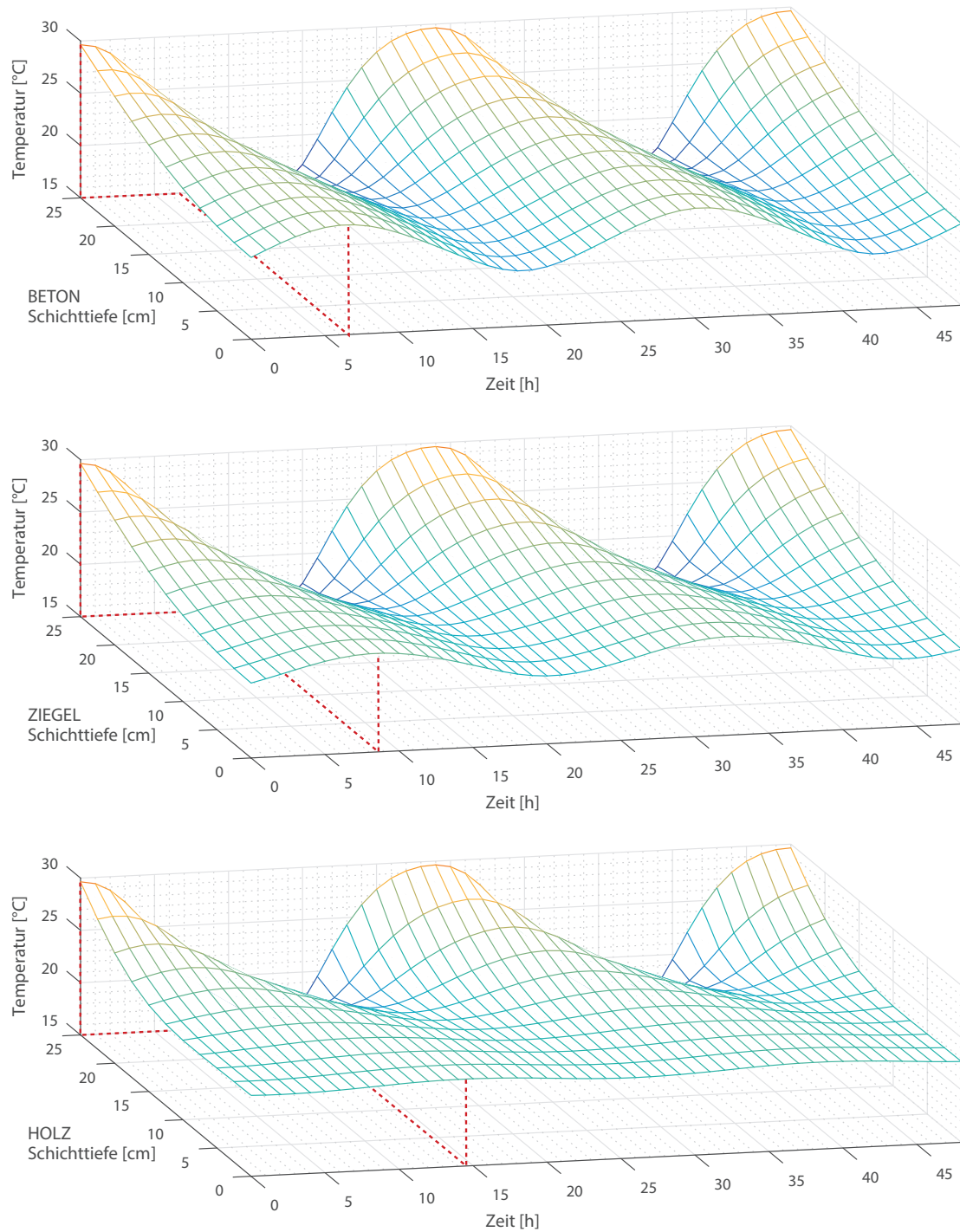
$$Z_{11} = \cosh(\xi) \cos(\xi) + j \sinh(\xi) \sin(\xi) \quad (2.23)$$

$$\xi = \frac{d}{\delta} \quad (2.24)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\lambda T}{\pi \rho c}} \quad (2.25)$$

$$\Delta t_{11} = \frac{T}{2\pi} \phi_{11} = \frac{T}{2\pi} \arg(Z_{11}) \quad (2.26)$$

In der Abbildung 2.8 ist auch die größere Phasenverschiebung  $\phi$  bei der Holzwand gegenüber den beiden anderen Baumaterialien erkennbar. Die zeitliche Verschiebung lässt sich für eine Schicht über Formel 2.26, ebenso mit dem Matrizeelement  $Z_{11}$ , berechnen. Der Einfluss



**Abbildung 2.8:** 3D-Darstellung der Temperaturwellen durch 25 cm dicke Bauteile aus Normalbeton, Ziegel und Holz bei einer 24 h Periode,  $R_{si,se} = 0 \text{ (m}^2 \text{ K)/W}$ .

des TAV als auch von  $\phi$  ist heute, also bei Konstruktionen mit normgemäßen Wärmeschutz (Außenwand  $U_{AW} \leq 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ), nur mehr von geringerer Bedeutung als früher bei meist ungedämmten Bauteilen. Bei einer Betonwand mit Vollwärmeschutz ( $U_{AW} = 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) ergibt sich beispielsweise ein Temperaturamplitudenfaktor von größer als 130. Bei Erhöhung des Dämmanteils hin zur Passivhaustauglichkeit ( $U_{AW} = 0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) ergeben sich bereits Werte um 500 und können abhängig vom Material auch ein Vielfaches davon erreichen. Bei einer typischen sommerlichen Tagestemperaturschwankung von 14K stellt ein 500-stel nur mehr eine Amplitude von 0,028 K dar. Durch die große Dämpfung wirkt sich auch eine Zeitverschiebung, die von den oft empfohlenen 10-12 h (um das Temperaturmaximum an der Innenoberfläche dann durch Nachtlüftung zum richtigen Zeitpunkt senken zu können) abweicht, nicht wesentlich aus.

Die Frage, mit welchen Parametern die effektive Wärmespeicherfähigkeit einer Konstruktion beschrieben werden kann, wird nicht nur von Studierenden, auch oft von PlanerInnen aus der Praxis schlicht mit der Wärmekapazität  $C$  [J/K] beantwortet. Sie bemisst zwar die Fähigkeit, thermische Energie zu speichern, ist aber eine Stoffeigenschaft. Konstruktionen bestehen in der Regel aus einer Schichtabfolge von verschiedenen Baumaterialien, womit  $C$  offensichtlich unzulänglich zur Beschreibung ist. Zudem ist die Wärmekapazität  $C$  noch nicht auf die Masse des Materials oder ein Volumen bezogen und somit ohne Angabe dieser wenig aussagekräftig hinsichtlich tatsächlichem Wärmespeichervermögen. Mit der spezifischen Wärmekapazität  $c$  wird ein Bezug zur Masse hergestellt. Die spezifische Wärmekapazitäten wird in  $\text{J}/(\text{kgK})$  angegeben und liegt für die meisten Baustoffe im Bereich um 1000  $\text{J}/(\text{kgK})$ . Holz und Holzwerkstoffe bilden mit spezifischen Wärmekapazitäten von bis zu ca. 2500  $\text{J}/(\text{kgK})$  jedoch eine Ausnahme. Aber auch mit dem Bezug zur Masse anhand der spezifischen Wärmekapazität können noch keine Beurteilungen zur effektiven Speicherfähigkeit eines Bauteils getroffen werden. Folgender Vergleich verdeutlicht die Aussagen: Expandiertes Polystyrol (EPS) ist als schaumstoffbasierter Dämmstoff bekanntlich ein schlechter Wärmespeicher, verfügt jedoch im Gegensatz zu Beton, als bekanntlich gutem Wärmespeicher, über eine höhere spezifische Wärmekapazität (EPS-F<sup>7</sup>:  $c=1450 \text{ J}/(\text{kgK})$ ) vs. Normalbeton:  $c=1000 \text{ J}/(\text{kgK})$ . Bei Annahme einer 25 cm dicken, einschichtigen Wand ergibt sich als flächenbezogene Wärmekapazität somit für EPS-F:  $C_{V,Eps}=6 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$  vs. Normalbeton:  $C_{V,Beton}=550 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ . Eine volumen- oder flächenbezogene Wärmekapazität ist demnach be-

---

<sup>7</sup>Materialkenndaten wurden an dieser Stelle und folgend der ÖNorm B 8110-7 [96] entnommen.



reits aussagekräftiger – jedoch fehlt es für eine korrekte Beschreibung an weiteren Faktoren. Die auf das Volumen bezogene Wärmekapazität wird Wärmespeicherzahl  $s$  [ $\text{J}/(\text{m}^3\text{K})$ ] genannt.

Neben der spezifischen Wärmekapazität und der Rohdichte ist auch die Wärmeleitfähigkeit von großer Bedeutung für das thermische Verhalten eines Bauteils. Interpretiert man ihre Einheit, so gibt die Wärmeleitfähigkeit Auskunft darüber, wie viel Wärmemenge in einer Sekunde bei einem Temperaturunterschied von 1 K durch eine 1 m dicke Stoffschicht von  $1 \text{ m}^2$  Fläche fließt. Temperaturänderungen breiten sich in einem Material umso schneller aus, je höher dessen Wärmeleitfähigkeit und je geringer die Rohdichte und die spezifische Wärmekapazität sind. Mit geringer Wärmeleitfähigkeit kann in beschränkter Zeit demnach auch nur ein kleiner Anteil an Wärme in geringe Tiefe (in Richtung des Wärmestromes) des Bauteils eindringen und somit weniger Masse für die Wärmespeicherung aktiviert werden. In der Literatur findet man oft verallgemeinerte Werte von etwa 10 cm. Auf Basis gewonnener Information ist jedoch klar, dass die Eindringtiefe von spezifischer Wärmekapazität, Rohdichte, Wärmeleitfähigkeit und in weiterer Folge natürlich auch dem Zeitfaktor abhängig ist. Die ersten drei Parameter werden in der sogenannten Temperaturleitfähigkeit  $a$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] laut Formel 2.27 abgebildet.

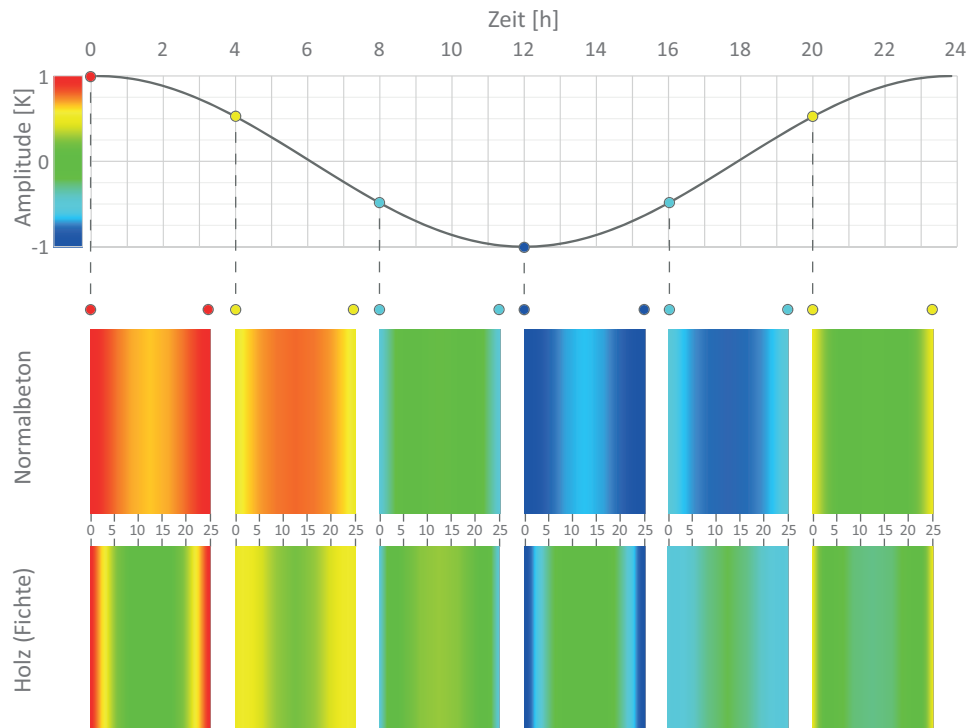
$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (2.27)$$

Genau diese Temperaturleitfähigkeit stellt auch den grundlegenden Bestandteil der eindimensionalen Wärmeleitungsgleichung (Formel 2.28) dar, die auf dem Fourierschen Wärmestromansatz beruht [67].

$$\frac{\partial}{\partial t}u(x, t) - a \frac{\partial^2}{\partial x^2}u(x, t) = 0 \quad (2.28)$$

Die Temperaturleitfähigkeit von Normalbeton beträgt etwa  $7,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , die von Holz (Fichte) ca.  $1,6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ . Temperaturänderungen breiten sich also in Normalbeton etwa 5-mal so schnell wie in Massivholz aus. Holz reagiert also träge auf Erwärmung sowie Abkühlung, es stellt eine gute aber langsam reagierende Wärmespeichermasse dar. Zur grafischen Demonstration werden in Abbildung 2.9 die bereits zuvor erwähnten, einfachen, einschichtigen Bauteile, die 25 cm Beton- und Holzwand, einer sich stetig wiederholenden 24 h Periode einer sinusförmigen Temperaturschwankung als Randbedingungen unterzogen und die Temperaturverteilung im Bauteil im 4 h Takt dargestellt.

Es wird damit auch verständlich, dass die effektive oder wirksame Wärmespeicherfähigkeit einer Konstruktion gravierend von der Anordnung ihrer Schichtmaterialien abhängig ist. Dies impliziert natürlich



**Abbildung 2.9:** Darstellung der instationären Temperaturverteilung bei periodischen Randbedingungen (24 h). Instationäre Bauteilsimulation mit AnTherm<sup>®</sup>.

auch, dass bei mehrschichtigen, plattenförmigen Bauteilen, wie beispielsweise einer Wand, in der Regel unterschiedliche effektive Speicherfähigkeiten an der Innenseite und der Außenseite vorherrschen. Die wirksame Speicherfähigkeit an der Innenseite des Bauteils beeinflusst das sommerliche Verhalten eines Raumes, die wirksame Speicherfähigkeit an der Außenseite ist üblicherweise bei wärmetechnisch normgemäßen – also gut gedämmten Bauteilen – wenig relevant. PlanerInnen können somit durch Materialwahl und Schichtanordnung wesentlich Einfluss auf die wirksame Speicherfähigkeit eines Bauteils nehmen. Die Wärmespeicherfähigkeit eines massiven Bauteils wird beispielsweise durch eine Installationsebene, Innendämmung oder abgehängte Decke stark gemindert, andererseits kann durch entsprechende Materialwahl der innenraumseitigen Schichten (z. B. dicker Lehmputz etc.) die effektive Speicherfähigkeit einer Leichtbau-Konstruktion wesentlich verbessert werden. Als Definition für die wirksame Wärmekapazität  $C_m$  wird folgender Ansatz herangezogen (vgl. [66]):

$$C_m = \frac{T}{2 \cdot \pi} \cdot \left| \sum_n \tilde{L}_{m,n} \right| \quad (2.29)$$

$C_m$  in Gleichung 2.29 ist die wirksame Wärmekapazität der gesamten, dem Raum mit Index  $m$  zugewandten Oberfläche. Wird als Konstante  $T$  die Periodenlänge in Sekunden eingeführt, so ergibt sich die wirksame Wärmekapazität in  $\text{JK}^{-1}$ . Die Größen  $\tilde{L}_{m,n}$  sind die harmonischen thermischen Leitwerte, die die instationäre thermische Verkopplung zwischen den Räumen mit den Indizes  $m$  und  $n$  beschreiben<sup>8</sup>. Der Ansatz 2.29 ist auf beliebig gestaltete und zusammengesetzte, an beliebig viele unterschiedliche Räume angrenzende Baukonstruktionen anwendbar. Die harmonischen thermischen Leitwerte sind jeweils überall an die Baukonstruktion angrenzende Räume, also auch über den betrachteten Raum  $m$  zu summieren.

Im Spezialfall eindimensionaler Wärmeleitung grenzen zum einen nur zwei Räume an die Baukonstruktion. Zum anderen ist bei plattenförmigen Bauteilen der Bezug auf die Bauteilfläche in eindeutiger Weise möglich, sodass sich die Einführung der flächenbezogenen wirksamen Wärmespeicherkapazität  $X$  als Bauteileigenschaft gemäß

$$X_1 = \frac{C_1}{A} = \frac{T}{2 \cdot \pi} \cdot \left| \frac{\tilde{L}_{1,1}}{A} + \frac{\tilde{L}_{1,2}}{A} \right| = \frac{T}{2 \cdot \pi} \cdot |\tilde{Y}_{1,1} + \tilde{Y}_{1,2}| \quad (2.30)$$

anbietet. Das Konzept der flächenbezogenen wirksamen Wärmekapazität  $X_m$  findet in der ÖNorm EN ISO 13786 Anwendung, die zur Berechnung notwendigen komplexwertigen Größen  $\tilde{Y}_{1,1}$  und  $\tilde{Y}_{1,2}$  stellen dabei flächenbezogene harmonisch thermische Leitwerte dar. In der Norm wird in Gleichung (8) die flächenbezogene wirksame Wärmekapazität gemäß  $X_1 = \frac{C_1}{A} = \frac{T}{2 \cdot \pi} \cdot |\tilde{Y}_{1,1} - \tilde{Y}_{1,2}|$  eingeführt. Die Unstimmigkeit im Vorzeichen innerhalb des Betrages ist auf andere Vorzeichenkonventionen zurückzuführen. Der große Nachteil dieses Ansatzes besteht darin, dass er nur auf eindimensionale Wärmeleitung anwendbar ist. Die allgemeine Gleichung 2.29 gilt hingegen für mehrdimensionale Wärmeleitung und Baukonstruktionen, die an eine beliebige Anzahl von Räumen grenzen. Bei dem vereinfachten Berechnungsverfahren zur sommerlichen Überwärmung nach ÖNorm B 8110-3 wird  $X_1$  anhand Division durch eine Referenz-Wärmekapazität von  $c_0 = 1046,7 \text{ J}/(\text{kgK})$  in die flächenbezogene speicherwirksame Masse umgerechnet. Auf das vereinfachte Normverfahren wird detailliert in Abschnitt 3.2.2 eingegangen.

---

<sup>8</sup>Die Tilde über dem Symbol kennzeichnet eine komplexwertige Größe.

Abbildung 2.10 zeigt die Abhängigkeit der flächenbezogenen wirksamen Wärmekapazität  $X_1$  exemplarisch von den Schichtdicken der Baustoffe Normalbeton, Vollziegel und Fichtenholz (bei einer zugrundeliegenden 24 h Periode der Randbedingungen). Das obere Diagramm zeigt dabei den Verlauf von  $X_1$  bei entsprechender Schichtdicke bzw. Schichttiefe theoretisch unendlich dicker, plattenförmiger, homogener Wandscheiben ohne Wärmeübergangswiderstände<sup>9</sup>, beim unteren Diagramm ist die äußere Randbedingung durch einen sehr hohen Übergangswiderstand ( $R_{se} = 10^6 \text{ m}^2\text{K/W}$ ) als adiabat angenommen, um auch den Einfluss einer „sehr guten“ Außendämmung ersichtlich zu machen. Jede angegebene flächenbezogene wirksame Wärmekapazität bezieht sich demnach auf eine entsprechende Wanddicke, die außen stark abgedämmt wird.

Aus den Diagrammen wird ersichtlich, dass die Form der gezeigten Kurven sehr ähnlich ist. Die flächenbezogene wirksame Wärmekapazität nimmt ab einer gewissen Schichtdicke nicht mehr zu, erreicht an dieser Stelle ihr Maximum. Mit weiter steigender Schichtdicke fällt die flächenbezogene wirksame Wärmekapazität leicht ab und nähert sich bei großen Schichtdicken einem konstanten Grenzwert an, der in Abbildung 2.10 jeweils strichliert dargestellt wird.

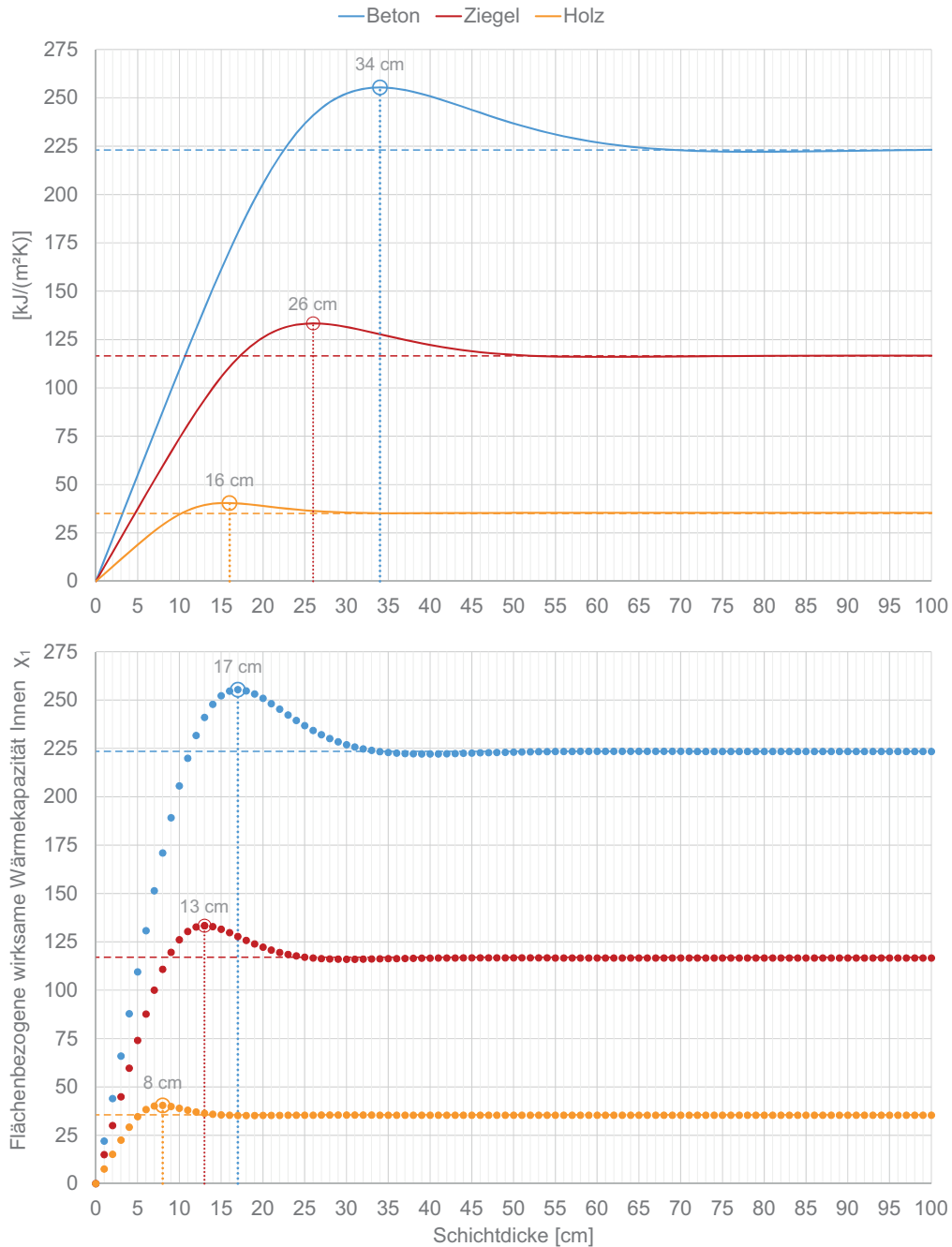
Bei Annahme keiner Übergangswiderstände (Abb. 2.10, oberes Diagramm) ergibt sich das Maximum von  $X_1$  bei Normalbeton bei einer Schichtdicke von ca. 34 cm, bei Vollziegel bei etwa etwa 26 cm und bei Fichtenholz bei etwa 16 cm – alles was über diese Dicken hinaus geht, wirkt sich bei der 24 h Periode also hinsichtlich Speicherfähigkeit nicht mehr relevant aus. Interessant ist es, wie sich die Schichtdicke eines homogenen Materials rechnerisch ermitteln lässt, bei der die flächenbezogene wirksame Wärmekapazität ihr Maximum erreicht. Für den Erhalt der Extremwerte einer Kurve wird die erste Ableitung gleich Null gesetzt. Die Dicke ergibt sich dann nach folgender Formel:

$$d_{max} = a \cdot \pi \cdot \delta \quad (2.31)$$

Der Wert von  $a = 0,752835$  ergibt sich aus der Nullstelle der ersten Ableitung. Die Schicht erreicht so bei der etwa 2,4-fachen Dicke der periodischen Eindringtiefe  $\delta$  (Formel 2.25) das Maximum der wirksamen Wärmespeicherkapazität.

Bei außen adiabat angenommenen Randbedingungen (Abb. 2.10, unteres Diagramm) hingegen ergibt sich das Maximum von  $X_1$  bei Normalbeton bei einer Schichtdicke von ca. 17 cm, bei Vollziegel bei etwa 13 cm und bei Fichtenholz bei etwa 8 cm.

<sup>9</sup>Dies bedeutet, dass als Randbedingungen nicht die zeitlichen Verläufe der Lufttemperatur, sondern jene der Oberflächentemperatur betrachtet werden.



**Abbildung 2.10:** Oben: Flächenbezogene wirksame Wärmekapazität bei entsprechender Schichtdicke eines homogenen Bauteils aus Beton, Ziegel oder Holz bei einer 24 h Periode der thermischen Randbedingungen,  $R_{si} = 0, R_{se} = 0$  ( $\text{m}^2\text{K})/\text{W}$ . Unten: Flächenbezogene wirksame Wärmekapazität verschieden dicker homogenen Bauteile aus Beton, Ziegel oder Holz bei einer 24 h Periode der thermischen Randbedingungen, mit äußeren adiabaten Randbedingungen, sprich ein sehr hoher Übergangswiderstand  $R_{si} = 0, R_{se} = 10^6$  ( $\text{m}^2\text{K})/\text{W}$ .

Wie bereits erwähnt hängt die wirksame Speicherfähigkeit und damit die „wirksame“ Eindringtiefe natürlich auch von der Einflussdauer bzw. wenn mit periodisch ändernden Randbedingungen betrachtet von der zugrundeliegenden Periode ab. In Abbildung 2.11 sieht man bei verschiedenen Periodendauern (Tag, Woche, Monat, Jahr) wieder exemplarisch für die Baustoffe Normalbeton und Fichtenholz die entsprechende maximale flächenbezogene wirksame Wärmekapazität und konforme Schichtdicke (bei  $R_{se} = 10^6 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ ). Für das Fichtenholz ist demnach bei der Tagesperiode eine Schichtdicke von 8 cm für maximale Speicherfähigkeit ausreichend, bei der Jahresperiode wären es 149 cm. Die hier dargestellte Eindringtiefe unterscheidet sich wie bereits beschrieben von der periodischen Eindringtiefe (siehe Formel 2.25) der ÖNorm EN ISO 13786, bei der sich die Amplitude der Temperaturschwankungen in dem homogenen Baustoff unendlicher Dicke, der einer sinusförmigen Schwankungen der Oberflächentemperatur ausgesetzt ist, um den Faktor  $e$  verringert<sup>10</sup> – sie ist etwa 2,4-mal so groß. Die Tagesperiode ist für die Berechnung der sommerlichen Überwärmung von Räumen von Interesse, da das periodische Ansetzen eines heißen Sommertages dem Ende einer Hitzeperiode nahekommt (kritischer Fall). Die Wochen- und Monatsperioden sind von geringerer Bedeutung, können ggf. bei temporär beheizten Räumen von Interesse sein, die Jahresperiode wird bei sehr massiven Gebäuden relevant, wo große Speichermassen vorhanden sind oder auch bei erdberührten Bauteilen, wo das Erdreich als sehr großer Wärmespeicher Einfluss nimmt (weiterführende Informationen in [81]). Bei der Jahresperiode spricht man dann beispielsweise von Langzeitwärmespeichervermögen im Gegensatz zum Kurzzeitspeichervermögen bei einer Tagesperiode.

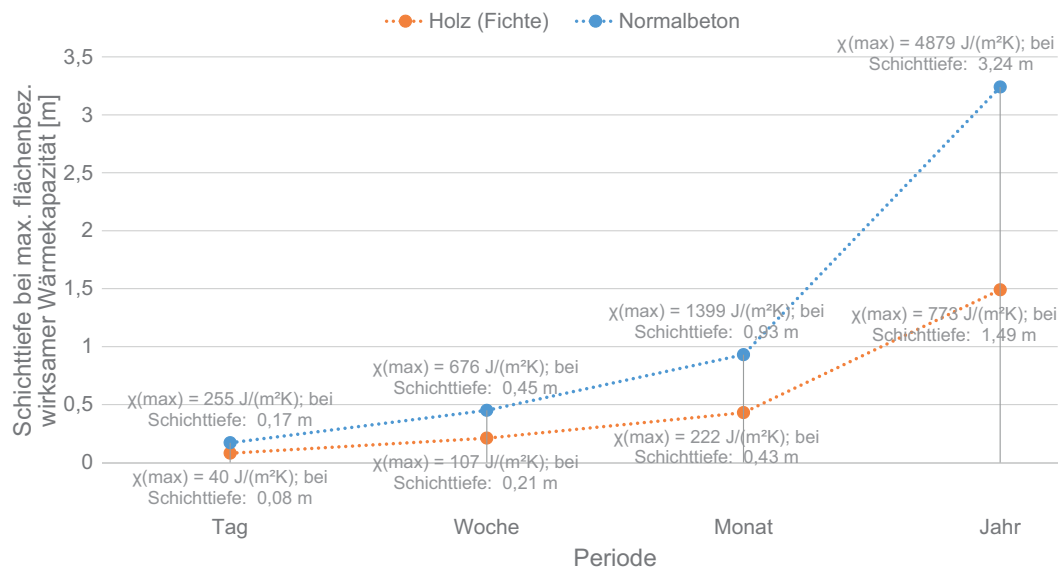
Im folgenden Abschnitt soll die Auswirkung der Wärmespeicherfähigkeit von Bauteilen nun weggehend von reiner Bauteilbetrachtung hin zur Raumbetrachtung aufgezeigt werden. Der Effekt unterschiedlich speicherwirksamer, raumbegrenzender Bauteile einerseits auf den Verlauf der operativen Temperaturen im Sommer und somit auf die Überhitzungsstunden, andererseits auch auf den Heizwärmebedarf im Winter soll untersucht werden.

#### 2.4.1 Auswirkung auf operative Raumtemperatur und Heizwärmebedarf

In [20] wurde im Zuge von Untersuchungen an Holzleichtbeton-Konstruktionen die Speicherfähigkeit verschiedener Bauteile gegenübergestellt. Anhand einer thermischen Gebäudesimulation eines Raumes ein-

---

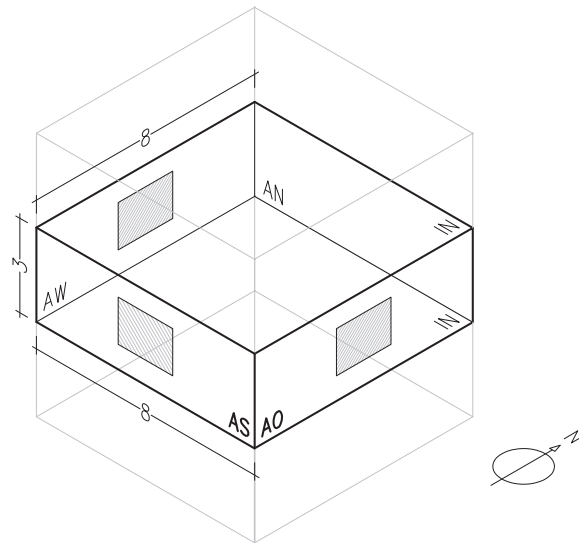
<sup>10</sup>Basis des natürlichen Logarithmus  $e = 2,718$



**Abbildung 2.11:** Eindringtiefe bei maximaler flächenbezogener wirksamer Wärmekapazität zur jeweiligen Periodendauer.  $R_{si} = 0$ ,  $R_{se} = 10^6$  (m<sup>2</sup>K)/W.

facher Geometrie (Außenmaße: 8 m × 8 m × 3 m wie in Abb. 2.12) wurde die Auswirkung der Wärmespeicherfähigkeit raumbegrenzender Bauteile auf die operative Raumtemperatur im Sommer als auch auf den Heizwärmebedarf im Winter exemplarisch untersucht. Wichtigste Informationen und Ergebnisse werden folgend zusammengefasst.

Vier verschiedene Konstruktionsarten wurden ausgewählt, bestehend aus einer Leichtbauvariante, zwei Massivbauvarianten und auch einer Holzleichtbeton-Variante (HLB). Die umschließenden Wandflächen wurden als Außenwände modelliert, Decken und Bodenplatten hingegen als adiabate Grenzen, also als Grenzen eines thermodynamischen Systems an denen kein Wärmetransport stattfindet – wie es für Flächen der Fall ist, die an Räume mit gleichen thermischen Bedingungen angrenzen. Der Modellraum wurde mit drei dreifach-verglasten Holzfenstern ( $A_{AL}=3$  m<sup>2</sup>,  $U_g=1,23$  W/(m<sup>2</sup>K),  $g=0,59$ ) ausgestattet, von denen je eines nach Osten, Süden und Westen ausgerichtet ist. Die Simulation wurde zur Verdeutlichung und einfacheren Vergleichbarkeit ohne zusätzliche Verschattungssysteme durchgeführt, da dies, speziell im Fall der Massivbauweise, eine Reduktion der sommerlichen Überhitzungsstunden auf Null bedeutet hätte. Für die Außenwandflächen wurden gemäß den Anforderungen der OIB Richtlinie 6 Aufbauten mit einem U-Wert unter 0,35 W/(m<sup>2</sup>K) gewählt. Alle verschiedenen Außenwände weisen einen U-Wert von 0,33 W/(m<sup>2</sup>K) auf. Die Decken wurden der Spannweite entsprechend dimensioniert. Die verwendeten Wand-

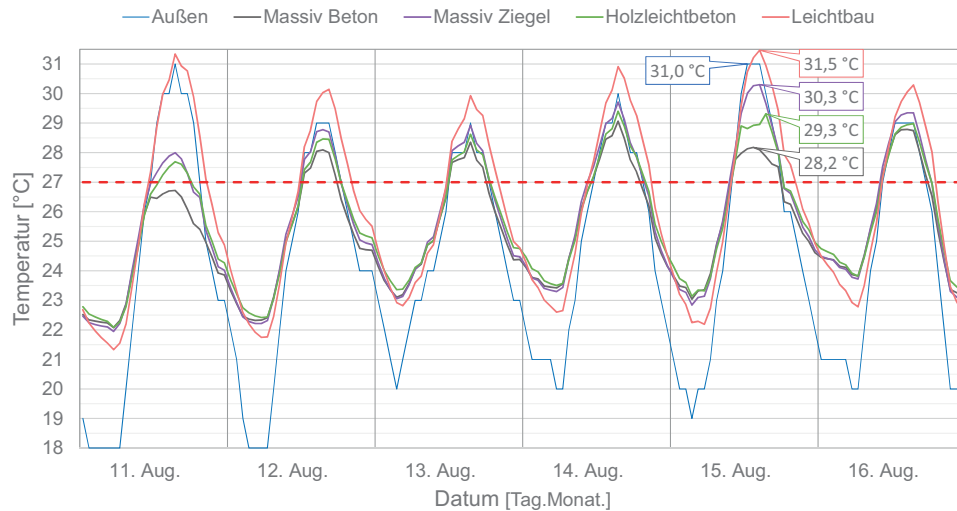


**Abbildung 2.12:** Simulationsraum zur Verdeutlichung der Wärmespeicherung von Bauteilen. Außenabmessungen  $8\text{ m} \times 8\text{ m} \times 3\text{ m}$ . Außenwand Ost (AO), Außenwand Süd (AS), Außenwand West (AW), Außenwand Nord (AN), adiabate Bauteile an ähnliche Räume: IN.

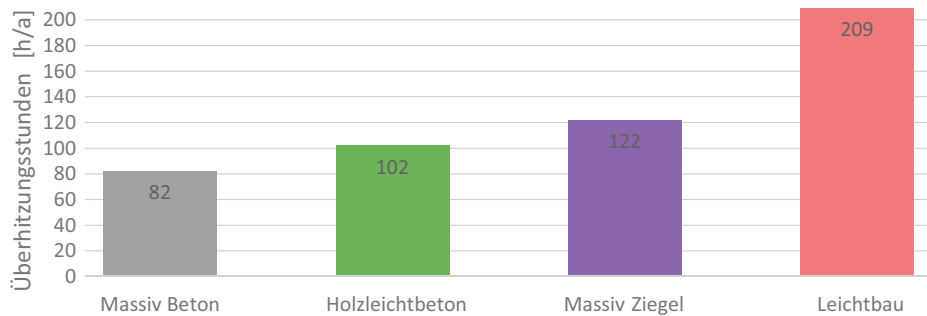
und Deckenaufbauten, sowie die Kennwerte der verwendeten Materialien finden sich im Anhang B. Für die Wintermonate wird eine Beheizung des Raumes auf  $20\text{ °C}$  angenommen. Für die Sommermonate wird, sofern die nächtliche Außentemperatur unter der Innenraumtemperatur liegt, von nächtlichem Lüften mit geöffneten Fenstern, und somit von einer natürlichen Konditionierung der Raumtemperatur, ausgegangen. Die inneren Wärmegewinne werden als konstant angenommen. Es wird mit einer permanent anwesenden Person mit einer Wärmeleistung von  $90\text{ W}$  und zusätzlichen Wärmelasten durch elektronische Geräte in der Höhe von  $2\text{ W/m}^2$  gerechnet. Die Luftwechselrate durch Infiltration wird konstant mit  $0,1\text{ h}^{-1}$  angenommen. Die Simulation wurde mit dem thermischen Gebäudesimulationsprogramm EDSL Tas 9.3.1 durchgeführt.

Abbildung 2.13 zeigt den Verlauf der operativen Raumtemperatur während einer sommerlichen Hitzeperiode bei den unterschiedlichen Aufbauten (und somit unterschiedlichen innenseitigen effektiven Wärmekapazitäten). Die maximale operative Raumtemperatur ergibt bei der hier aus Demonstrationsgründen bewusst sehr leicht gewählten Holzbauweise  $31,5\text{ °C}$ . Das Maximum der operativen Temperatur liegt für die Holzleichtbeton-Variante im Simulationsraum bei  $29,4\text{ °C}$ , und somit zwischen jener der Stahlbetonbauweise ( $29,1\text{ °C}$ ) und jener der Ziegelbauweise ( $30,3\text{ °C}$ ). Es ergibt sich somit eine Differenz der





**Abbildung 2.13:** Verlauf der operativen Raumtemperatur in sommerlicher Hitzeperiode bei verschiedenen Aufbauten der Raumhülle.

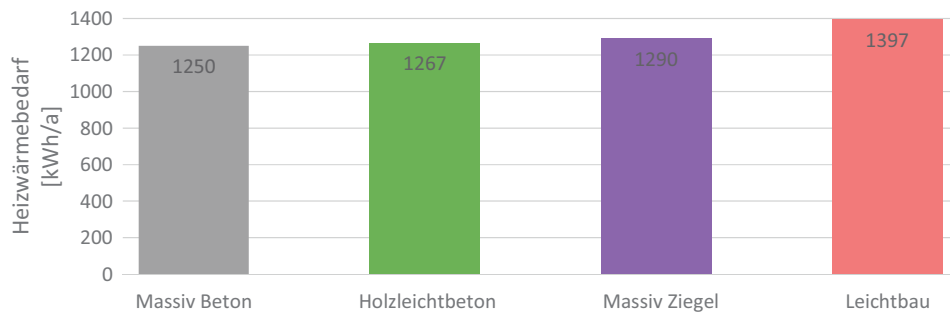


**Abbildung 2.14:** Anzahl der sommerlichen Überheizungsstunden bei verschiedenen Aufbauten der Raumhülle.

maximalen Temperaturen von 2,4K. Da der Wärmedurchgangskoeffizient  $U$  bei allen Wandaufbauten  $0,33 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  beträgt, kann diese Differenz ausschließlich auf die unterschiedlichen Wärmekapazitäten der verschiedenen Bauweisen zurückgeführt werden.

Abbildung 2.14 zeigt die Anzahl der jährlichen Überheizungsstunden (operative Raumtemperatur  $> 27^\circ\text{C}$ ) für die verschiedenen Bauweisen. Bei dem gewählten Beispiel ergeben sich bei der leichten Bauweise 209 h, bei der massiven Betonbauweise lediglich 82 h. Die Ziegelbauweise weist 122 Überheizungsstunden, die Holzleichtbetonbauweise eine etwas geringere jährliche Überheizungsstunden von 102 Stunden.

Des Weiteren wurde der Einfluss der Wärmespeicherfähigkeiten der verschiedenen Aufbauten auf den Heizenergiebedarf des Simulations-



**Abbildung 2.15:** Jährlicher Heizwärmebedarf bei verschiedenen Aufbauten der Raumhülle.

raumes untersucht. Abbildung 2.15 zeigt den jährlichen Heizenergiebedarf abhängig von der jeweiligen Bauweise. Im Vergleich zur Holzleichtbauweise werden bei Verwendung der massiven Betonbauweise etwa 150 kWh/a weniger an Heizenergie benötigt. Die beiden Massivbauvarianten und die Holzleichtbeton-Verbundbauweise liegen bezüglich des Heizenergiebedarfs sehr dicht beieinander (Beton: 1250, HLB: 1267, Ziegel: 1290 kWh/a). Es lässt sich demnach erkennen, dass die wirksame Speichermasse – wenngleich im geringeren Maße – Auswirkung auf den Heizwärmebedarf des Raumes hat, jedoch sichtlich mehr Auswirkung hinsichtlich der Dämpfung der operativen Raumtemperatur-Maxima zeigt. Die Unterschiede hinsichtlich dem HWB verringern sich des Weiteren nachvollziehbar bei Erhöhung des Wärmeschutzes. Eine unterschiedliche Bauweise (jedoch gleicher Leitwert des Raumes) wirkt sich im Passivhausstandard auf den HWB geringer aus (<3,5% [23]) als bei normgemäßen Mindestwärmeschutz (Beispiel oben angeführter Simulationsraum: 9%). Sehr wohl aber wirkt sich die Bauweise, oder genauer die „innere“ wirksame Speicherkapazität des Raumes auch bei Passivhäusern auf den Verlauf der operativen Raumtemperatur aus.

In [65] wird unter anderen Einflussfaktoren auf das sommerliche Verhalten von Räumen auch die Bauweise und damit die Speicherfähigkeit anhand von Parameterstudien durch thermische Gebäudesimulation untersucht. Als Conclusio ergibt sich darin, dass massive Bauweisen insbesondere im Niedrigstenergiehausbereich ihre Vorteile ausspielen, weniger im Mindestwärmeschutz- oder Passivhausstandard. Sie helfen Temperaturspitzen zu vermeiden und lindern negative Auswirkungen von technischen Gebrechen und/oder Nutzungsfehlern auf das Innenraumklima. Die Planungsempfehlung ist also klar eine Sicherung der notwendigen Wärmespeicherfähigkeit durch massiven Aufbau von Fußboden, Innenwänden und/oder Decken.

Die innere Wärmekapazität ist jedoch nicht wie oft propagiert die bedeutendste Einflussgröße für die sommerliche Behaglichkeit in Räumen. Die speicherwirksame Masse des Raumes stellt demnach nur einen groben Anhaltswert für die Fähigkeit des Raumes, Wärme bei sinusförmiger Tagesschwankung der Temperatur aufzunehmen und wieder abzugeben [65]. Fehlende Verschattungsmaßnahmen großer Verglasungen, also hohe solare Wärmelasten wie auch andere hohe innere Lasten und fehlende oder falsche Lüftungsmaßnahmen können auch durch hohe interne Speicherkapazität nicht ausgeglichen werden und führen zu überhitzten Räumen im Sommer. Rein bauteilbasiert kann demnach keine Prognose für Sommertauglichkeit eines Raumes abgegeben werden – zu viele Raumeigenschaften wie eben die anteilige Fensterfläche, Verschattungsmaßnahmen, Lüftungsverhalten, Raumorientierung, -größe und -nutzung etc. sind neben der Wärmespeicherung maßgebende Einflussfaktoren, die im Abschnitt 2.5 detaillierter behandelt werden.

## 2.5 Einflussfaktoren auf das sommerliche Innenraumklima

Die wesentlichen Einflussfaktoren des sommerlichen Innenraumklimas sind bereits hinreichend bekannt und ihre Wertigkeit in diversen Parameterstudien untersucht worden (z. B. [65], [53], [28], [24], [33], [117], [78], etc.). Es sind in erster Linie die äußeren klimatischen Bedingungen, die solaren Wärmeeinträge (vor allem über transparente Bauteile), die ggf. vorhandene Verschattung dieser Flächen, das Lüftungsverhalten, die internen Lasten im Raum, sowie die Speichermasse der Bauteile die das sommerliche Klima eines Raumes wesentlich beeinflussen. In der Regel entspricht die zuvor gewählte Reihung auch der Priorität hinsichtlich Auswirkung auf die Raumtemperaturen bei heutigen thermischen Standards von Außenbauteilen.

Die ÖNorm B 8110-3 [92] erläutert einfürend, dass in Sommer- und Übergangszeiten folgende Faktoren wirksame (bautechnische) Mittel zur Vermeidung der Raumüberwärmung durch Sonneneinstrahlung darstellen:

- die Orientierung, Größe und Qualität der strahlungsdurchlässigen Flächen,
- die speicherwirksame Masse der raumumschließenden Bauteile sowie der Einrichtung,
- die Raumlüftung, insbesondere die Nachtlüftung und
- der Sonnenschutz.

In [65] werden z.B. die Parameter Bauweise, Fensterfläche, Verschattungseinrichtung, Orientierung der Fenster und Wärmedämmstandard anhand 648 Varianten zweier Testräume untersucht. Zusammengefasst aus dieser Untersuchung lässt sich folgende Conclusio bilden: Die Überwärmungsneigung der untersuchten Räume wird wesentlich durch den Wärmeeintrag aufgrund der Sonneneinstrahlung beeinflusst, womit Fenstergröße und Fensterorientierung als sehr einflussreiche Parameter für das Sommerverhalten von Räumen zu erachten sind. Dominierend wirkt sich die Wahl der Verschattungseinrichtung auf den Verlauf der sommerlichen Raumtemperatur aus. Im Falle natürlicher Belüftungsmöglichkeit führt die Möglichkeit, über verschiedene Fassadenebenen zu lüften, zu deutlich verbesserten sommerlichen Raumverhalten. Schwere Bauweise führt zu kleineren Tagesschwankungen der Raumtemperatur. In den gewählten Untersuchungsräumen wird anhand thermisch dynamischer Gebäudesimulation eine maximale Differenz der Tagesschwankung von 4,2 K ( $\Delta\Theta = \Theta_{max} - \Theta_{min}$ ) aufgrund der Bauweise ermittelt. In Hinblick auf das Erreichen der Sommertauglichkeit muss jedoch dafür gesorgt werden, dass mittels gezielter Begrenzung des Wärmeeintrages durch Sonneneinstrahlung und durch das Vorsehen guter Lüftungsmöglichkeiten der Tagesmittelwert der Raumtemperatur so niedrig liegt, dass die Vorteile der schweren Bauweise zum Tragen kommen. Der Wärmedämm-Standard der Außenbauteile hat für das Sommerverhalten nur untergeordnete Bedeutung. (Vgl. [65]).

In [28] werden die Einflussfaktoren Nachtlüftung, Sonnenschutz, Interne Lasten, Raumspeichermasse, Dauer der Hitzeperiode, Beplanung, Bodenbelag und Wärmedämmstoffart untersucht und sind hier bereits in ihrer Wirkungsgröße gereiht. Damit wird auch bestätigt, dass bedingt durch die guten Wärmeschutzeigenschaften der heutigen Gebäudehüllen und deren luftdichte Bauweise Vorkehrungen getroffen werden müssen, die Wärmelasten im Raum so gering wie möglich zu halten und die vorhandenen Wärmelasten gezielt durch Lüftungsmaßnahmen nachts abzuführen.

In [33] werden speziell Holzbauten untersucht. Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit decken sich mit oben genannten Erkenntnissen und man kommt zu ähnlichem Fazit: Die wichtigsten Einflussgrößen auf das sommerliche Raumklima sind die Lüftung durch Fensteröffnung und damit die Abfuhr der internen und solaren Wärmelasten, sowie die Fenstergröße und die Verschattung der Fenster durch Bedienung des außenliegenden Sonnenschutzes, welche die solare Einstrahlung in das Gebäude begrenzen. Es wird verdeutlicht, dass die Planung und das Nutzerverhalten eine große Rolle im Zusammenhang mit dem som-

merlichen Raumklima spielen.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes der Holzforschung Austria, beschrieben in [117], wurden an einem errichteten bauphysikalischen Forschungshaus mit wechselbaren Außenwandelementen Messungen zum sommerlichen Verhalten durchgeführt. Wiederum wurde der Einfluss von Bauweise (speicherwirksame Masse), der Fenster inklusive Beschattungselemente (solarer Eintrag) und Luftwechsel auf die thermische Behaglichkeit in Holzbauten untersucht. U.a. wurde dabei der Einfluss auf das Temperaturverhalten bei Holzrahmenbauweise vs. Massivholzbauweise, bei unterschiedlichen Dämmstoffen, inneren Beplankungen und äußeren Fassaden (solarer Absorptionskoeffizient) analysiert. Bezüglich den verschiedenen Holzbauweisen konnten bei den untersuchten Räumen Differenzen der operativen Temperatur von 2 K gemessen werden. Bei den Bauteiluntersuchungen ergab sich folgende Reihung der Faktoren nach Wirkung auf die Innenoberflächentemperatur und verdeutlicht damit auch den Einfluss des Absorptionsgrades der Fassade, sprich der Farbe (wenngleich auch gering im Gegensatz zu am Beginn dieses Abschnitts genannten Einflussfaktoren):

1. Fassadenfarbe (für  $\alpha$ : 0,24 - hell bzw. 0,83 - dunkel)  
 $\Delta T = 0$  bis 1 K ( $U=0,25$  W/m<sup>2</sup>K)
2. Dämmung  
 $\Delta T = 0,3$  bis 0,5 K ( $U=0,13$  W/m<sup>2</sup>K)
3. Bauweise  
 $\Delta T = 0,1$  bis 0,3 K ( $U=0,13$  W/m<sup>2</sup>K)  
 $\Delta T = 0,5$  bis 1 K ( $U=0,25$  W/m<sup>2</sup>K)
4. Beplankung  
 $\Delta T = 0,1$  bis 0,3 K ( $U=0,13$  W/m<sup>2</sup>K /  $U=0,25$  W/m<sup>2</sup>K)

Ergebnisse solcher Untersuchungen beziehen sich auf Messungen oder Simulationen unterschiedlich und speziell gearteter Räume, Bauteilaufbauten, Randbedingungen, Raumnutzungen, etc. und erschweren dadurch eine exakte Vergleichbarkeit. Sie weichen in den quantitativen Ergebnissen etwas voneinander ab, kommen aber dennoch im Allgemeinen zu relativ deckenden, bereits genannten Erkenntnissen.

Trotz bereits einführend genannter Parameter, soll an dieser Stelle thematisch<sup>11</sup> geordnet und zusammenfassend auf einzelne Einflüsse mit einer kurzen Beschreibung und möglicher bzw. typischer Abbildung in Simulationsprogrammen eingegangen werden. Anschließend soll in Abschnitt 2.5.5 eine weitere Übersicht von Parametern – in etwas anderer Art und Weise als üblich – erfolgen. Nämlich als Auflistung der wich-

---

<sup>11</sup>Eine themenbezogene Zuordnung ist nicht immer eindeutig möglich, da die Einflussfaktoren z.T. von einander abhängen oder einander beeinflussen.

tigsten Variablen, die für eine thermisch dynamische Raumsimulation definiert werden müssen. Es wird dabei vorwiegend auf die benötigten Eingaben des Gebäudesimulationsprogrammes Geba bei periodisch eingeschwungenen Randbedingungen eingegangen, da das im Zuge dieser Arbeit entwickelte Planungswerkzeug auf dem Rechenkern dieser Simulationssoftware beruht. Es gibt bei dieser Aufzählung zwar keine Wertung, jedoch gibt es schnell Aufschluss darüber, welche Variablen (wenn tw. auch nur mit geringem Einfluss) Auswirkung auf das simulierte Raumklima haben. Zudem soll diese Auflistung auch PlanerInnen mit wenig Erfahrung in der Gebäudesimulation die meist umfangreichen Spezifikationen vor Augen führen und gleichzeitig als Basis für die Entwicklung eines neuen benutzerfreundlichen Planungswerkzeuges dienen. Dafür soll diese Liste wo möglich (durch Standardvorgaben) reduziert werden und BenutzerInnen aufwändige Eingaben abgenommen werden (siehe Kapitel 6.2).

## 2.5.1 Klimabedingter Einfluss

### 2.5.1.1 Thermische Randbedingungen

Das interessierende Innenraumklima ist abhängig von den äußeren Randbedingungen der raumbegrenzenden Bauteile. Diese definieren, ob ein raumbegrenzender Bauteil an einen Außenraum, an einen weiteren Innenraum oder auch an das Erdreich grenzt. Dazu gehören natürlich sämtliche angrenzende Räume, z. B. alle horizontal angrenzenden Räume, durch Wände getrennt, als auch die vertikal angrenzenden Räume, durch Boden- und Deckenplatte getrennt. Bei Annahme einer periodischen Wiederholung eines heißen Sommertages<sup>12</sup> und zur Verdeutlichung des Einflusses auch die Annahme, dass keine Wärmeinträge und Wärmeverluste vorherrschen, so entspricht der Mittelwert des Außentemperaturverlaufes auch dem Mittelwert der Innentemperatur. Natürlich auch in Folge des immer vorhandenen Austausches zwischen Innenluft und Außenluft spielt der Tagesgang der Außenlufttemperatur eine Rolle [39]. Die thermischen Randbedingungen zählen dadurch im Grunde selbsterklärend zu den einflussreichen Parametern der sommerlichen Innenraumtemperatur.

Hinsichtlich der Abbildung der thermischen Randbedingungen auf Seiten des Außenraumes werden in Simulationsprogrammen nach periodisch eingeschwungenem System für einen Sommertag in der Regel 24 Stundenwerte angegeben, um einen aussagekräftigen Tagesverlauf der Temperatur darstellen zu können. Eine alternative Möglichkeit den

---

<sup>12</sup>Das System der Periodizität ist auch in der österreichischen Normung für die Berechnung festgelegt.

Außentemperaturverlauf abzubilden ergibt sich dadurch, dass der Außentemperaturverlauf dem einer Sinusform sehr nahe kommt. So wird der Einfachheit der Datenbeschaffung wegen, der Verlauf eines sich periodisch wiederholenden Tagesverlaufs durch die Angabe von einem Tagesmittelwert, der Norm-Außentemperatur (NAT-T13<sup>13</sup>) und der Temperaturschwankung, sowie Phasenverschiebung generiert. Die österreichische Norm B 8110-3 gibt dazu stündliche Abweichungen von dem Mittelwert an. Die Normaußentemperatur NAT-T13 kann für österreichische Standorte über die Angabe der Katastralgemeinde (wo jeweils Temperaturmessungen vorliegen) und die Höhenlage berechnet werden. Bei Zeitschrittverfahren werden je nach thermischer Masse des untersuchten Modells bis zu mehreren Wochen stündliche Außentemperaturwerte nötig um einen eingeschwungenen Zustand des Raumtemperaturverlaufs zu erreichen. Die EN ISO 13791 erläutert dazu folgendes: Es ist eine Abfolge mehrerer Tage auszuwählen, die repräsentativ für die wärmsten Bedingungen eines gegebenen Klimas ist. Da die wärmsten Innenbedingungen nicht zwingend mit den wärmsten Außenbedingungen zusammenfallen, ist es möglicherweise erforderlich, die verschiedenen klimatischen Bedingungen über mehrere Monate zu betrachten. Für jeden Monat ist die Bemessungs-Wärmeperiode durch Stundenwerte der Außenlufttemperatur zu definieren.

Grenzt ein Raum an einen weiteren Innenraum wird bei der Berechnung anhand eines Einzonenmodells vereinfacht angenommen, dass sich alle den untersuchten Raum angrenzenden Innenräume thermisch gleich verhalten wie der interessierende Raum selbst. Wenn die Innenbedingungen des angrenzenden Raumes stark von den vorstehend angegebenen Bedingungen abweichen, müssen die tatsächlichen Randbedingungen mithilfe eines Mehrraummodells berechnet werden. Bei erdberührten Bauteilen ist die Temperatur des Erdreichs von Interesse. Bei der Simulation eines periodisch angenommenen Julitages kann aufgrund der Trägheit des Erdreichs vereinfacht das Monatsmittel der Außentemperatur des voran gegangenen Monats Juni angenommen werden. In der EN ISO 13792 [94] wird der monatliche Mittelwert der Außenlufttemperatur des aktuellen Monats verwendet.

### 2.5.1.2 Solare Einträge

Der Verlauf der Bestrahlungsstärken (flächenbezogene Leistungen) von direkter und diffuser Sonnenstrahlung für jede Orientierung der Außenflächen ist von großer Bedeutung hinsichtlich des thermische Verhaltens

---

<sup>13</sup>NAT-T13: Normaußentemperatur, mit einer durchschnittlichen Überschreitungshäufigkeit von nur 13 Tagen im Jahr.

eines Innenraumes. In der Regel sind nämlich die solaren Einträge die größten Wärmelasten<sup>14</sup> in einem sommerlichen Innenraum. Sie erfolgen in erster Linie durch die Einstrahlung der Sonne durch die transparente Gebäudehülle. Die Größe der Fensterflächen, deren Ausrichtung und Neigung und die Art der Verglasung sind maßgeblich für das sommerliche Raumverhalten. Sonnenschutzvorrichtungen im effektivsten Fall außenliegend, aber auch die Beschattung durch andere Bauteile oder die Umgebung können die solaren Wärmeeintrag erheblich reduzieren. In [7] wird verdeutlicht, dass wirksamer sommerlicher Wärmeschutz ohne Verschattung nicht möglich ist. Die in [117] durchgeführten Berechnungen ausgewählter Räume zeigen, dass die Art des Sonnenschutzes auf die operative Temperatur einen Einfluss von bis zu 9 K haben kann. Die solare Strahlung und Strahlungsdurchgang bei Verglasungen wurden bereits in den Abschnitten 2.2 und 2.3 behandelt. Bei heutigen thermischen Standards der opaken Bauteile sind die solaren Wärmeeinträge über diese im Verhältnis zu den Einträgen über transparente Flächen jedoch verschwindend klein, wenngleich natürlich je nach Absorptionsvermögen der sonnenbeschienenen Außenfläche diese eine mehr oder minder starke Erwärmung erfährt.

Zur Abbildung in Simulationsprogrammen können im Falle einer periodischen Betrachtung auch hier 24 Stundenwerte für jede Orientierung angegeben werden, um einen aussagekräftigen Tagesverlauf der Bestrahlungsstärken darzustellen. Meteorologische Messungen stehen jedoch nicht für alle Orte zur Verfügung und beziehen sich dann meist nur auf die Horizontalfläche und nicht auf beliebig orientierte Flächen. Um bei der Sonnenstrahlung die Anzahl der Eingabedaten zum Zweck einer einfacher erhältlichen Datengrundlage zu verringern, können die gewünschten Ergebnisse über die Angabe weniger Daten (Datum, Uhrzeit, geografische Lage und zwei meteorologische Angaben/Trübungs-faktoren) generiert werden [44]. In der Regel werden die Strahlungsflüsse auf die unterschiedlichen Fassadenorientierungen durch das Simulationsprogramm automatisiert berechnet. Durch die Trübungs-faktoren Linke und Reitz wird der Trübungs-zustand der Atmosphäre beschrieben (siehe dazu Abschnitt 2.2). Zusätzlich wird der Albedo Wert notwendig, um die terrestrische Reflexstrahlung ermitteln zu können, sowie die Himmelstemperatur für den langwelligen Strahlungsaustausch der Außenoberflächen mit dem Himmel. Bei nicht periodisch simulierenden Zeitschrittverfahren werden je nach thermischer Masse des untersuchten Modells wiederum bis zu mehreren Wochen stündliche Solarstrah-

---

<sup>14</sup>Bei speziellen Raumnutzungen können weitere interne Wärmelasten, generiert durch beispielsweise Maschinen, Geräte oder große Personenanzahl im Raum die solaren Wärmeeinträge übertreffen.



lungswerte nötig. Die EN ISO 13791 erläutert dazu folgendes: Für jeden Tag der Bemessungs-Wärmeperiode sind durch Stundenwerte die direkten und diffusen (vom Himmel und vom Boden reflektierten) Anteile der Sonnenstrahlung auf die verschiedenen Fassaden zu definieren.

## 2.5.2 Material- und konstruktionsbedingter Einfluss

### 2.5.2.1 Bauweise, Bauteilaufbauten, Oberflächen

Bezüglich der Bauweise wird gerne die Klassifizierung nach leicht, mittel und schwer vorgenommen. In der ÖNorm B 8110-6 [87] werden die Eigenschaften grob definiert:

- Als leichte Bauweisen sind Gebäude in Holzbauart ohne massive Innenbauteile einzustufen <sup>15</sup>
- Als mittelschwere Bauweisen sind Gebäude in Mischbauweise, Gebäude in Massivbauweise mit abgehängten Decken und überwiegend leichten Trennwänden einzustufen
- Als schwere Bauweisen sind Gebäude mit großteils massiven Außen- und Innenbauteilen, schwimmenden Estrichen und ohne abgehängte Decken einzustufen
- Als sehr schwere Bauweisen sind Gebäude mit sehr massiven Außen- und Innenbauteilen (Altbaubestand) einzustufen

Tatsächlich ist es aber die wirksame Wärmespeichermasse eines Raumes oder Gebäudes abhängig von dessen Volumen, das über die Bauschwereklassen anhand eines Einzahlwertes Auskunft gibt. Hohe speicherwirksame Massen eines Raumes entsprechen dabei einer schweren Bauweise. Nach Formel (51) der Norm [87] ergibt sich z.B. für einen Innenraum mit  $5 \cdot 5 \cdot 3 \text{ m}^3$  konditioniertem Brutto-Volumen eine wirksame Wärmespeicherfähigkeit  $C$  des Raumes von 750 Wh/K bei leichter, 1500 Wh/K bei mittelschwerer, 2250 Wh/K bei schwerer, und 4500 Wh/K bei sehr schwerer Bauweise.

In [7] wird u. a. der Einfluss von Masse bzw. der Bauweise auf den sommerlichen Wärmeschutz untersucht. Dabei wird sichtbar, dass die Bauweise, reduziert auf die speicherwirksame Masse einen eher geringen Einfluss übt – verglichen mit den Einflussfaktoren Verschattung und Lüftung.

In [20] wurde die Auswirkung verschiedener Bauweisen (leicht, mittel, schwer) auf das sommerliche Innenraumklima anhand eines Bei-

---

<sup>15</sup>Die Beschreibung der leichten Bauweise ist hier nicht treffend gelungen: Jegliche Skelett- oder Rahmenbauweise mit Ausfachungen durch Materialien geringer speicherwirksamer Masse kann als Leichtbauweise gelten – der Bezug zu einem speziellen Material (Holz) ist an dieser Stelle nicht gerechtfertigt.

spielraumes aufgezeigt. Abb. 2.13 zeigt den Verlauf der operativen Raumtemperatur während einer sommerlichen Hitzeperiode bei den unterschiedlichen Aufbauten und somit unterschiedlichen innenseitigen effektiven Wärmekapazitäten, jedoch selben Wärmedurchgangskoeffizienten. Klar ersichtlich ist die Dämpfung der Temperaturspitzen bei Aufbauten mit größerer speicherwirksamer Masse. Da die Bauweise sehr mit der Thematik der Wärmespeicherung zusammenhängt sei auf das einführende Kapitel 2.4 verwiesen.

Die bereits einführend bei der Wärmespeicherung erwähnte Phasenverschiebung und Temperaturamplitudendämpfung, die die oft im Zuge der Bauschwere für Diskussion sorgen, sind zwar Bauteileigenschaften, sagen aber nichts über den dahinterliegenden Raum aus. Bei heutigen Konstruktionen ist der Einfluss dieser Größen wie in Abschnitt 2.4 erläutert sehr gering, da sich das Wärmeschutzniveau wesentlich verbessert hat. Das Passivhausinstitut vermerkt diesbezüglich, dass bei den im Passivhaus vorliegenden Dämmqualitäten die stationäre Dämpfung bereits so groß ist, dass die dynamische Dämpfung und damit das Temperaturamplitudenverhältnis (TAV) keine Rolle mehr spielt. Der Einfluss der solaren Einträge durch Fenster und auch die Lüftungsmaßnahmen ist weitaus höher als der Effekt durch die Bauteile. (Vgl. auch [55]).

Die speicherwirksame Masse „schwerer Bauweisen“ kann auch nur effektiv genutzt werden, wenn beispielsweise durch Nachtlüftung ein ausreichend kühler Luftstrom in ausreichendem Maße für eine Kühlung der Bauteiloberflächen sorgt (vgl. [24]). Hochwärmegeämmte Bauteile verringern nach [117] den Einfluss der Bauweise und halten die Innenoberflächentemperaturen im Inneren gering.

Generell ist anzumerken, dass bei gleicher thermischer Qualität der Außenhülle des Raumes die errechneten Tagesmittelwerte für Varianten, die sich nur in Hinblick auf die Bauweise unterscheiden, gleich sind. Die Bauweise beeinflusst nur den Tagesverlauf in dem Sinn, dass die Tagesamplitude mit wachsender Wärmespeicherfähigkeit der raumbegrenzenden Bauteile kleiner wird. Dies bedeutet u. a. auch, dass Räume, die aufgrund zu hoher Innenwärmen einen über 27 °C liegenden Tagesmittelwert aufweisen, durch Veränderung der Bauweise allein nicht sommertauglich gemacht werden können. [65]

Die Eigenschaften der Bauteiloberflächen haben Auswirkungen auf deren Oberflächentemperaturen durch den Strahlungsaustausch (langwelliger Strahlung) mit anderen Bauteilen oder der Umgebung. Absorptionsgrade bestimmen dabei wie viel der langwelligen Strahlung aufgenommen wird. Außenbauteile mit einem hohen solaren Absorptionsgrad führen zu höheren Innenoberflächentemperaturen. Die Wir-

kung der Farbe hängt nach [117] von der Orientierung des Bauteils, der Lage zur Sonne und der Dämmeigenschaften des Aufbaues ab.

Die Abbildung der Bauweise in Simulationsprogrammen ergibt sich durch die Spezifikation der raumumschließenden Bauteile – dabei ist die Schichtenreihenfolge mehrschichtiger Baukonstruktionen von Relevanz und von jeder Schicht die Materialeigenschaften, beschrieben durch die thermophysikalischen Kenngrößen Massendichte  $\rho$ , Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und die spezifische Wärmekapazität  $c$ . Auch jede Schichtdicke ist anzugeben. Jedem Bauteil sind die Werte der Wärmeübergangskoeffizienten für Konvektion und Strahlung entsprechend der dort herrschenden Wärmeübergangsverhältnisse individuell zuzuordnen. Der langwellige Strahlungsaustausch zwischen den Bauteilen wird unterschiedlich abgebildet, im einfachsten Verfahren proportional zur Temperaturdifferenz und flächengewichtet [120]. Die Angabe der Emissionskoeffizienten der Bauteiloberflächen wird dafür auch nötig. Bei detaillierteren Verfahren wird die genaue geometrische Beschreibung des Raumes erforderlich, um Sichtfaktoren berechnen zu können.

### 2.5.2.2 Wärmeschutzstandard und Dämmstoffart

Grundsätzlich kann bei niedrigen Wärmedurchgangskoeffizienten der Außenbauteile Wärme in geringeren Maßen vom heißen Außenraum in den Innenraum gelangen, jedoch umgekehrt auch überschüssige Wärme im Innenraum schlechter nach Außen entweichen (bei gegebenen Wärmestrom nach Außen). Bei hohen Wärmeschutzstandards wird dementsprechend auch eine Abführung erhöhter Raumwärme durch (Nacht-) Lüftungsmaßnahmen von größerer Relevanz.

In [65] werden Untersuchungen zu den Auswirkungen verschiedener Wärmedämm-Standards vorgenommen, wobei zwischen einer Ausführung nach Bauordnung, einer Ausführung in Niedrigenergiebauweise und einer Ausführung in Passivbauweise unterschieden wird. Die errechneten Tagesgänge der Raumlufttemperatur verlaufen dabei in etwa parallel. Der Wärmedämm-Standard schlägt sich daher im Wesentlichen in unterschiedlichen Tagesmittelwerten der Raumlufttemperatur nieder, wobei sich bei den analysierten Räumen ein Unterschied der Tagesmitteltemperatur in der Höhe von knapp 1 K ergibt. In Hinblick auf die Sommertauglichkeit erweist sich der niedrige Wärmedämmstandard (Bauordnung) als deutlich kritischer als der Passivhausstandard und der Niedrigenergiestandard. Die Niedrigenergiebauweise schneidet generell am besten ab. Dieses Ergebnis mit beeinflussend sind jedoch auch die den Standards angepassten Fenster-Verglasungen mit unterschiedlichen  $g$ -Werten. (Vgl. [65]).

Die Untersuchungen in [12] zeigen, dass der Einfluss des Wärme-

durchgangskoeffizienten der Außenbauteile bei normgemäßen Aufbauten zwar eine Rolle spielt, dieser allerdings im Verhältnis zu anderen Parametern als untergeordnet angesehen werden kann.

Die Auswirkung unterschiedlicher Dämmstoffe bei heute üblichen U-Werten ist auch als gering zu bewerten. In [55] zeigt sich bei untersuchten Räumen einen Einfluss von ca. 1 K auf die maximale Raumtemperatur. Dämmstoffe wie Zellulose oder Holzfaserdämmplatten mit vergleichsweise höheren spezifischen Speicherkapazitäten dämpfen dabei die Temperaturspitzen besser als z. B. hartschaumbasierte Dämmstoffe wie EPS.

### 2.5.2.3 Verglasung

Die Größe der solaren Wärmeeinträge in den Raum hängt u. a. auch von den Materialeigenschaften der transparente Teile der Gebäudehülle ab. Verglasungen mit niedrigen Gesamtenergiedurchlassgraden, also kleinen g-Werten, können die solaren Wärmeeinträge erheblich reduzieren. Auf den Strahlungsdurchgang bei Verglasungen wurde bereits in Kapitel 2.3 eingegangen, u. a. zeigt Tabelle 2.2 eine Bandbreite verschiedener Verglasungen mit entsprechenden g-Werten. Auch die Fensterrahmen können je nach Größe und Material mehr oder minder Einfluss auf das Raumklima haben (vor allem durch Verminderung der transparenten Fläche bei großen Rahmenanteil).

Die Abbildung von Verglasungen in Simulationsprogrammen benötigt vereinfacht den g-Wert als auch den U-Wert der Verglasung, bei detaillierter Simulation werden bereits wesentlich mehr Parameter nötig: Bei Mehrfachverglasungen z. B. für jede Scheibe, die Wärmeleitfähigkeit, Massendichte, Wärmekapazität, Absorption und Dicke, der Durchlasswiderstand jedes Scheibenzwischenraumes. Überdies der Strahlungsreflexionsgrad, der Strahlungstransmissionsgrad, als auch der Exponent der Verglasung.

## 2.5.3 Standort und geometriebedingter Einfluss

### 2.5.3.1 Standort, Umgebung

Der Standort hat (bei der Berechnung) insofern Einfluss auf das Innenraumklima, da sich dadurch die beiden bei den klimabedingten Einflüssen erläuterten Größen Solare Einträge und Außentemperaturen ergeben. Anhand der geografischen Position in Kombination mit dem Datum ergibt die Sonnenbahn am Gebäudestandort. Aus dieser leiten sich mit Seehöhe und meteorologischen Informationen wiederum Bestrahlungsstärken ab. Die Lage beeinflusst das Strahlungsangebot auch

(z. B. Hanglage oder andere Horizontüberhöhungen). Die Außentemperaturen können nicht direkt vom Standort abgeleitet werden, sondern beruhen auf Messungen. Die Höhenlage hat erfahrungsgemäß Einfluss auf die Außentemperatur und auch das Strahlungsangebot. Bei Berechnung der Normaußentemperatur nach [89] (Beiblatt 1) wird das für die Temperatur ersichtlich: für Seehöhen von nicht mehr als 1500 m wird die Normaußentemperatur bezogen auf die niedrigste Seehöhe innerhalb des Katasterpolygonzuges pro 100 Höhenmeter um 0,2 K reduziert, für Seehöhen von mehr als 1500 m um 0,5 K. Der Verlauf der Temperatur über den Sommertag kann wie in Abschnitt 2.5.1.1 beschrieben eruiert werden. Auch die Umgebung wirkt sich auf die Außentemperatur aus. Dabei gibt es beispielsweise nachweislich gemessene Temperaturunterschiede abhängig ob sich der Raum im städtischen Gebiet befindet, oder im ländlichen, grünen Bereich. Unverbaute Gebiete und Freigelände weisen einen höheren Sky View Faktor (SVF) auf als dicht verbaute Stadtgebiete. Ein geringer SVF bedingt, dass Strahlung nur eingeschränkt in Richtung Firmament reflektiert werden kann. In der Nacht kann es dadurch zu einem verminderten Wärmeabstrahlvermögen aus den Gebäuden in Richtung Himmel kommen. Die Wärme verbleibt bei mangelnder Durchlüftung im Stadtgebiet und wird nicht abtransportiert ([53], [29]). Durch Vegetation in der Umgebung oder an an der Gebäudefassaden und -dächern kann das Mikroklima auch im städtischen Gebiet verbessert werden.

Abgebildet wird diese Information in Simulationsprogrammen durch die Angabe der geografischen Position und Seehöhe. Die Verschattung durch Horizontüberhöhung ist in Abschnitt 2.5.3.2 behandelt. Der Einfluss von der Umgebung kann beispielsweise durch die Albedo und auch den SVF abgebildet werden, Mikroklimata können derzeit nur durch die Angabe gemessener Temperaturen abgebildet werden.

### 2.5.3.2 Verschattung

Die Verschattung (vor allem transparenter Außenbauteile) bewirkt eine sehr wirksame Reduktion der solaren Wärmeeinträge in den Raum. Die Beschattung kann durch Dachüberstände, Balkone, (tiefere) Laibung und Stürze, Eigenverschattung durch die Kubatur des Gebäudes selbst (z. B. bei Innenhöfen), durch feststehenden Sonnenschutz, speziell ausgeformte Fassaden (Faltung etc.), durch Vegetation (Bäume), Nachbargebäude im nahen Horizont, Hanglage, oder auch Gebirge im fernen Horizont etc. erfolgen. Nutzungsbedingter, beweglicher Sonnenschutz wird in Abschnitt 2.5.4.1 behandelt.

Die Abbildung der Verschattung durch die Umgebung und durch

das Gebäude selbst kann in Simulationsprogrammen in der Regel für verglaste Außenflächen berücksichtigt werden z. B. über die Spezifikation von Verschattungsgängen mit stündlichen Angaben zur Verschattung (z. B. Geba) oder bei Vorhandensein dreidimensionaler Gebäudegeometrie automatisiert über Berechnung sogenannter Verschattungsmatrizen (z. B. Trnsys). Zum Teil können fixe Verschattungselemente wie Leisten (Sturz, Laibungen, Balkonplatten, etc.) auch über Angabe der Tiefe und Abstand zur Verglasung festgelegt werden.

### 2.5.3.3 Raumgeometrie

Aus Ergebnissen von Gebäudesimulationen lässt sich beobachten, dass das sich das Raumvolumen auf die operativen Raumtemperaturen auswirkt. Umso größer der Raum bei sonst gleich bleibenden Parametern wird, umso geringer werden die maximalen operativen Raumtemperaturen. Wie begründet sich dieser Effekt?

Das Raumvolumen beeinflusst das thermische Verhalten eines Raumes im Zuge einer thermischen Simulation nur dann, wenn die durch Lüftung induzierten Wärmeströme über Luftwechselzahlen beschrieben werden. Nur in diesem Fall fließt das Raumvolumen in die Berechnung des Lüftungsleitwertes ein und scheint damit als Einflussgröße in der Wärmebilanzgleichung auf. Beim Rechnen mit Luftwechselzahlen wird – vernünftig angenommene Lüftungsstrategie (z. B. verstärkte Nachtlüftung) vorausgesetzt – ein kleinvolumiger Raum gemäß Simulationsergebnissen ein kritischeres Sommerverhalten aufweisen als ein Raum mit größerem Volumen. Verantwortlich für diesen Effekt ist allein die Tatsache, dass mit der Vergrößerung des Raumvolumens auch der Luftvolumenstrom ansteigt. Wird hingegen die Lüftung allein über die Größe, Lage und Form der Lüftungsöffnungen (z. B. gemäß den vereinfachten Ansätzen der ÖNorm B 8110-3 [92], Anhang B) definiert, so hängt das thermische Verhalten des Raumes in keiner Weise vom Raumvolumen ab (abgesehen durch die sich durch innere Oberflächenerhöhung ergebende erhöhte speicherwirksame Masse des Raumes).

Es ist davon auszugehen, dass das Raumvolumen auch in der Realität nur einen vernachlässigbar kleinen Einfluss auf das thermische Verhalten eines Raumes ausüben wird. Natürlich besitzt auch die Luft ein Wärmespeichervermögen, das Einfluss auf die sich einstellenden Temperaturverläufe nimmt. Im Vergleich zu den Wärmespeichervermögen der Bauteile ist jenes der Luft jedoch so klein, dass es guten Gewissens vernachlässigt werden kann <sup>16</sup>.

---

<sup>16</sup>Diese Überlegung trifft nur auf das Raumvolumen, über das bilanziert wird, zu. Im

Die Kompaktheit des Raumes, beschreibbar durch die sogenannte charakteristische Länge<sup>17</sup> zeigt auch Auswirkung auf das Raumklima. Durch den geringeren Anteil der Hüllfläche bei größer werdender charakteristischer Länge sinken die Transmissionswärmeverluste des Raumes, sofern die Immissionsflächen als absolute Konstante angesehen werden. Durch diese geringeren Verluste wird eine allfällige Über-temperatur länger im Raum gehalten. [12]

Die Verteilung der Wärmegewinne der direkten Sonneneinstrahlung ist neben Sonneneinfallswinkel, dem Reflexionsgrad der Bauteiloberflächen für kurzwellige Strahlung und Einrichtungsgegenständen auch von der Raumgeometrie (geometrische Maße der Verglasung und des Raumes) abhängig. Detaillierte Simulationsmodelle berücksichtigen die Geometrie und Zeitabhängigkeit der Verteilung der einfallenden Strahlung auf Innenflächen [50]. Vereinfacht kann die Strahlung gleichmäßig und flächenproportional auf alle Bauteile des Raumes aufgeteilt werden [120], typischerweise werden aber Verteilungsfaktoren für Fußboden, Wände und Decke spezifiziert. Die EN ISO 13791 [93] liefert Anhaltswerte, die auf eine über die inneren Oberflächen des Raumes gemittelte Reflexionszahl für Sonnenstrahlung bezogen sind. Bei einem Raum mit mittlerem Reflexionsvermögen ( $0,3 < \rho < 0,7$ ) fallen 0,5 Anteile auf den Fußboden, 0,4 Anteile auf die Wände und 0,1 Anteil auf die Decke.

Die Raumgeometrie wird über die raumabschließenden Flächenangaben als auch über die Angabe des Raumvolumens in Simulationsprogrammen abgebildet. Bezüglich der Absorption der in den Raum eintretenden Strahlung werden die Absorptionskoeffizienten der inneren Bauteilflächen als Angabe notwendig.

#### 2.5.3.4 Fenster-, Bauteilgeometrie und Ausrichtung

Wie in Abschnitt 2.5.1.2 bereits erläutert, bestimmt die Fenstergeometrie maßgeblich die Größe der solaren Einträge und damit das sommerliche Innenraumklima. Je größer die Fenster, desto größer auch die solaren Wärmeeinträge. Die Orientierung der Fenster ist für die tageszeitliche Verteilung des solaren Eintrages verantwortlich. Aus den sommerlichen Strahlungsflüssen (Abb. 2.4) kann man ableiten, dass ost- und westorientierte Fenster während der Sommermonate einen hohen solaren Eintrag aufweisen. Im Osten und Westen, beziehungsweise Südost und Südwest muss davon ausgegangen werden, dass aufgrund flacher einfallenden Direktstrahlung Verschattungseinrichtungen nur be-

---

Fall der Lüftung bzw. von Luftvolumenströmen, die dem Raum zugeführt werden, muss die Wärmespeicherfähigkeit der Luft natürlich berücksichtigt werden

<sup>17</sup>Die charakteristische Länge  $l_c = V/O_h$  ist eine theoretische Länge, die das Verhältnis zwischen dem Volumen eines Körpers und dessen Oberfläche ausdrückt.

dingt wirksam sind und mit erhöhter solarer Einstrahlung zu rechnen ist (vgl. [12]).

Bei vergleichbaren Räumen mit Fenstern an nur einer Fassadenseite erreichen jene mit westorientierten Fenstern die höchsten operativen Raumtemperaturen (vgl. [117]). Die Strahlungsflüsse zeigen auch, dass im Hochsommer die Globalstrahlung auf die Horizontale eindeutig die größten Werte einnimmt, somit Dachflächenfenster ohne Sonnenschutzmaßnahmen leicht die Hauptursache für sommerliche Überhitzung werden können. Wie bereits einführend erwähnt sind die solaren Einträge über opake Bauteile bei heutigen Wärmedämmstandards im Vergleich zu den Einträgen über die Verglasungen vernachlässigbar klein.

Die Abbildung in Simulationsprogrammen erfolgt für Bauteilgeometrie über einfache Flächenangaben, Ausrichtung und Neigung werden per Azimut und Neigungswinkel spezifiziert.

## 2.5.4 Nutzungsbedingter Einfluss

### 2.5.4.1 Lüftung

Die Lüftung hat einen erheblichen Einfluss auf das Raumklima. Man kann sie zwar planen, die Nutzung bleibt in der Regel aber in der Hand des Bewohners [55].

Die Temperatur der zugeführten Luft ist dabei natürlich von großer Bedeutung. Nachts, wenn die Außenlufttemperaturen in unseren Breiten in der Regel unter den Innenraumlufttemperaturen liegen, ist eine Lüftung besonders günstig. Das Konzept beruht darauf, dass der gesamte Wärmeeintrag, der tagsüber in das Gebäude gebracht wird, nachts mithilfe der kühleren Außentemperaturen an die Umgebung abgeführt wird [24]. In sommerlichen Hitzeperioden stellt Lüftung tagsüber mit unconditionierter Außenluft ( $\theta_e > \theta_i$ ) lediglich eine weitere Wärmequelle für den Raum dar.

Bei natürlicher Lüftung hängt der Luftvolumenstrom in den Raum von der Lüftungsöffnungsfläche (Größe des Öffnungsflügels, Öffnungszustand gekippt oder gänzlich geöffnet), der Form<sup>18</sup> und Anordnung der Fenster (Querlüftung), von den Lufttemperatur- und ggf. Luftdruckunterschieden zwischen innen und außen, ggf. Höhenunterschieden zwischen den Fenster, als auch den Windverhältnissen im Außenraum ab. In der Praxis gestaltet sich jedoch die natürliche (Nacht-)Lüftung durch Aspekte wie Einbruchgefahr, Witterungseinfluss oder Schallschutz oft schwierig.

Die ÖNorm B 8110-3 [92] bietet ein Verfahren zur Ermittlung des

---

<sup>18</sup>Hohe Fenster erlauben einen höheren temperaturinduzierten Luftvolumenstrom als weniger hohe Fenster gleicher Öffnungsfläche.



Luftvolumenstroms durch natürliche Belüftung, berücksichtigt jedoch ausschließlich temperaturinduzierte Luftströmungen. Auch wie immer gearteten Strömungsbehinderungen wie beispielsweise Insektenschutzgitter oder Vorhänge sind nicht in der Berechnung berücksichtigt. Bei dem vereinfachten normgemäßen Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes werden lediglich Luftwechselzahlen in Abhängigkeit von der Lage der Lüftungsöffnungen im Raum vorgegeben: bei einer Fassaden- oder Dachebene  $1,50 \text{ h}^{-1}$ , bei zwei Fassaden- oder Dachebenen  $2,50 \text{ h}^{-1}$  und bei drei oder mehrere Fassaden- oder Dachebenen  $3,00 \text{ h}^{-1}$ .

In [117] werden verschiedene Lüftungskonzepte für Wohnungen und Einfamilienhäuser gegenübergestellt. Die dabei durchgeführten Berechnungen zeigen, dass der Volumenstrom (geöffnete, gekippte Fenster, Lüftungsanlage) bei den ausgewählten Räumen auf die operative Temperatur einen Einfluss von bis zu 13 K haben kann. Überdies wurde anhand von Tracergasmessungen das Lüftungsverhalten bei gekipptem und geöffnetem Fenstern inklusive ggf. vorhandenen Insekten- und Pollenschutzgittern an einzelnen Räumen untersucht. Beispielsweise beträgt der Unterschied zwischen einer geöffneten Balkontüre, mit und ohne Pollengitter ca. das 15-fache. Die Untersuchung verdeutlicht, dass der Einsatz von Insektenschutzgittern und im speziellen Pollenschutzgitter zu einer Reduktion des Luftaustausches beiträgt. Bei einem Pollenschutzgitter liegt der Luftvolumenstrom bei geöffnetem Fenster in etwa im Wertebereich für ein kleineres gekipptes Fenster bzw. Dachflächenfenster ohne Querschnittsreduktion [117].

Auch nach [6] ist für das sommerliche Verhalten von Räumen ohne mechanische Kühlung die nächtliche Wärmeabfuhr über ausreichend große Öffnungen entscheidend; eine mechanische Lüftung mit einem 2,5 fachen Luftwechsel hat bei weitem nicht die Wirkung von offenen Fenstern.

Vor allem für Wohnnutzung installierte Komfortlüftungsanlagen können für die Temperaturreduzierung im Sommer kaum genutzt werden. Sie sind in der Regel für den hygienisch notwendigen Luftwechsel im Winter ausgelegt und können mit einem Luftwechsel von  $0,3\text{--}0,5 \text{ h}^{-1}$  kaum zur Kühlung beitragen. Dabei wirken sich Erdwärmetauscher/Erdregister positiv aus. Bei Anlagen mit Wärmerückgewinnung ist auf einen Bypass zu achten, der im Sommer die Wärmerückgewinnung umgeht. (vgl. [55]).

Die Abbildung der Lüftung in Simulationsprogrammen erfolgt in der Regel durch Angabe einer Luftwechselzahl für Räume unter Spezifizierung der Luftwechselquelle (z. B. Außenluft). Dabei wird typischerweise zwischen Infiltration, also dem Luftaustausch zwischen innen und außen durch Gebäudeundichtheiten, dem Luftwechsel durch natürliche

Lüftung und mechanischer Lüftung unterschieden. Herrscht kein konstanter Luftwechsel vor, so kann meist der stündliche Verlauf der Luftwechselzahl spezifiziert werden. Geba hat beispielsweise die Berechnung des Luftvolumenstromes nach ÖNorm B 8110-3 implementiert. In der Regel wird eine vollständige Durchmischung der Raumluft vorausgesetzt [120].

Auch wenn mithilfe der dynamischen Gebäudesimulation die Energieflüsse innerhalb des Gebäudes rechnerisch realitätsnah bilanziert werden können, lassen sich damit keine Aussagen zu den Raumluftverhältnissen (u. a. Luftgeschwindigkeit, Raumlufttemperaturen) in den verschiedenen Raumbereichen bzw. bei genauen Raumpositionen erhalten. Für solche speziellen Fragestellungen können zu den dynamischen Gebäudesimulationen noch sogenannte „Computational Fluid Dynamics“ (CFD) Simulationen, sprich Strömungssimulationen durchgeführt werden. Anwendungsfälle können speziell kritische Räume, z. B. zur Untersuchung der örtlichen Behaglichkeit an Arbeitsplätzen, die Entwicklung bzw. Analyse natürlicher Lüftungskonzepte (Gestaltung der Fenster und Fassadenöffnungen) oder technischer Lüftungskonzepte oder auch die Strömungsuntersuchung großer (Eingangs-)Hallen, Atrien, Räume mit speziellen Lüftungsverhältnissen etc. darstellen.

#### 2.5.4.2 Innere Lasten

Die inneren Wärmelasten eines Raumes setzen sich aus der Wärmeabgabe der sich im Raum aufhaltenden Menschen und im Raum befindlicher elektrischer Geräte sowie Beleuchtung zusammen und können je nach Anzahl und Wärmeleistung großen Einfluss auf das sommerliche Raumklima haben. Speziell bei Büronutzungen mit einer größeren Anzahl von Arbeitsplätzen können behagliche sommerliche Raumtemperaturen ohne aktive Kühlung oft nicht gewährleistet werden.

Die ÖNorm B 8110-3 [92] gibt minimal anzunehmende innere Lasten für den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes vor, die bei einer Wohnnutzung im Tagesverlauf zwischen 1,76 und 8,06 W/m<sup>2</sup> schwanken und bei Büronutzung zwischen 8 und 17 Uhr für Geräte 150 W und Personen 80 W pro Arbeitsplatz ausmachen. Ergeben sich aus den Vorgaben z. B. des Bauherrn höhere geplante oder zeitlich veränderte innere Lasten, ist lt. Norm der ungünstigere Fall zu berücksichtigen.

Bei vorgegebener Personenzahl im Raum liegt das größte Reduktionspotential also in der Verminderung der Geräte im Raum oder dem Einsatz von stromsparenden Geräten. Auch die Verwendung energie-sparender Beleuchtung kann das Ausmaß von Wärmequellen reduzieren. Im Idealfall wird durch gute Planung optimale Tageslichtnutzung möglich und Kunstlicht auf einem Minimum gehalten.

Die Abbildung der inneren Lasten in Simulationsprogrammen wird in der Regel durch den stündlichen Verlauf der Wärmelasten angegeben. Es wird üblicherweise zwischen inneren Lasten durch Geräte und Personen unterschieden. Die von Geräten abgegebene Wärmeleistung ist nicht mit der elektrischen Anschlussleistung zu verwechseln und kann dadurch in manchen Fällen überschätzt werden. Die Strahlung von im Raum befindlichen Wärmequellen wird in der Regel gleichmäßig und flächenproportional auf alle Bauteilflächen aufgeteilt [120].

### 2.5.4.3 (Beweglicher) Sonnenschutz

Wie bereits in den Abschnitten 2.5.3.2 und 2.5.1.1 erläutert, ist die Reduktion der solaren Strahlung in den Raum eines der wirksamsten Instrumente zur Verbesserung des sommerlichen Innenraumklimas.

Die Wirksamkeit der Sonnenschutzeinrichtung ist abhängig von deren Lage (außen-, zwischen-, oder innenliegend), der solaren Transmission, Absorption und der Reflexion der Sonnenschutzeinrichtung, sowie vom U-Wert und g-Wert der jeweiligen Verglasung. Teil 1 der ÖNorm EN 13363 gibt ein vereinfachtes, Teil 2 ein detailliertes Verfahren zur Berechnung an. Als Ergebnisse ergibt sich ein Gesamtenergiedurchlassgrad einer Sonnenschutzvorrichtung in Kombination mit einer Verglasung ( $g_{\text{total}}$ -Wert). Je effizienter ein Sonnenschutzprodukt ist, umso niedriger ist der  $g_{\text{total}}$ -Wert. Mittels beweglichem Sonnenschutz wird auch der Gesamtdurchlassgrad variabel einstellbar; damit kann das Raumklima trotz wechselnder äußerer Klimazustände (Winter, Sommer, Übergangszeiten) reguliert werden. Bei nicht über Sensoren automatisierten Systemen ist der Einfluss jedoch immer von (richtiger) Nutzung des beweglichen Sonnenschutzes abhängig.

Außenliegender Sonnenschutz liegt dabei in seiner Wirkung vor zwischenliegendem und dieser wiederum vor innenliegendem Sonnenschutz. Ist nur innenliegender Sonnenschutz möglich, so ist auf hohen Reflexions- und niedrigen Absorptionsgrad zu achten.

Üblicherweise wird der Grad der Verschattung der österreichischen Normung entsprechend durch einen Abminderungsfaktor  $F_c$ -Wert (entspricht dem früheren z-Wert) ausgedrückt. Dieser  $F_c$ -Wert ist dem Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) der Verglasung aufzumultiplizieren, um den g-Wert der Glas-Verschattungskombination ( $g_{\text{total}}$ ) zu erhalten. Der  $F_c$ -Wert ist jedoch wie bereits erläutert von oben genannten Parametern abhängig. Ein selbes Produkt führt bei unterschiedlicher Lage (innen vs. außen) oder auch bei unterschiedlich zu beschattenden Verglasungen zu anderen  $F_c$ -Werten. Richtwerte können der ÖNorm B 8110-3 [92] entnommen werden, Tabelle 2.4 zeigt einen Auszug daraus.

Die Abbildung für Sonnenschutzvorrichtung z. B. im Simulations-

**Tabelle 2.4:** Richtwerte für Sonnenschutzvorrichtungen nach ÖNorm B 8110-3 [92],  $F_c$  berechnet nach ÖNorm EN 13363-1 ( $U_g$  1,10 W/m<sup>2</sup>K).

Lage	Lichtdurchlass	Farbe	$\tau_{e,B}$	$\rho_{e,B}$	$F_c$	$F_c$	$F_c$
					$g=0,70$	$g=0,50$	$g=0,25$
außen	wenig	weiß	0,05	0,70	0,08	0,10	0,16
außen	stark	schwarz	0,4	0,10	0,49	0,55	0,76
innen	wenig	weiß	0,05	0,70	0,50	0,64	0,82
innen	stark	schwarz	0,40	0,10	0,91	0,93	0,96

programm Geba erfolgt bezüglich der Durchlässigkeit über Strahlungstransmissionsgrade für direkte und diffuse Strahlung. Diese hängen wesentlich vom Reflexionsvermögen der Jalousie, der Markise oder des Screens und – im Falle der Lamellenjalousie von der Lamellenstellung ab. Geba verwendet das Konzept des Gesamtenergiedurchlassgrades nicht, da dieses für die Berechnung von Oberflächentemperaturen – und somit auch empfundenen Temperaturen – nicht geeignet ist [68]. Überdies muss der Zeitintervall der Nützung und/oder auch Unter- und Obergrenzen für die Bestrahlungsstärke des Glases hinter der Jalousie festgelegt werden.

#### 2.5.4.4 Einrichtungsgegenstände

Die in Räumen vorhandenen Einrichtungsgegenstände wie Möblierung, Teppiche, etc. können das Wärmespeicherverhalten des Raumes und somit das Raumklima beeinflussen. Einerseits kann Möblierung zusätzliche Wärmespeicher darstellen, andererseits kann durch Teppiche die effektive Speicherwirksamkeit z. B. eines Fußbodens reduziert werden.

Näherungsweise können Einrichtungsgegenstände berücksichtigt werden. Im dynamisch thermischen Gebäudesimulationsprogramm Geba z. B. können Material und Größe der Möblierung als plattenartige Elemente in die Rechnung eingehen. Allgemein gibt die ÖNorm B 8110-3 beispielsweise als Richtwert für die speicherwirksame Masse der Einrichtung  $m_{w,E}$  38 kg pro m<sup>2</sup> Nutzfläche an. Die Verminderung der effektiven Speicherfähigkeit durch beispielsweise Teppiche müsste in dem Bauteilaufbau berücksichtigt werden.

### 2.5.5 Benötigte Variablen für Raumsimulation unter sommerlichen Bedingungen

Die wichtigsten, beispielsweise für das thermisch dynamische Simulationsprogramm Geba benötigten Eingabevariablen zur Berechnung sommerlicher Innenraumtemperaturen sind folgend aufgelistet.

#### Bauteilbezogen - Opa

- Wärmeleitfähigkeit jeder opaken Bauteilschicht
- Massendichte jeder opaken Bauteilschicht
- Wärmekapazität jeder opaken Bauteilschicht
- Schichtdicke jeder opaken Bauteilschicht
- Durchlasswiderstand jeder ggf. vorhandenen Luftschicht
- Absorptionszahl für Sonnenstrahlung für die Außenseite jedes Bauteils (oder Farbe)
- Absorptionszahl für langwellige Strahlung (Atmosphäre, Umgebung) für die Außenseite jedes Bauteils

#### Bauteilbezogen - Transparent

- Wärmeleitfähigkeit jeder Scheibe der Verglasung
- Massendichte jeder Scheibe der Verglasung
- Wärmekapazität jeder Scheibe der Verglasung
- Dicke jeder Scheibe der Verglasung
- Absorption jeder Scheibe der Verglasung
- Durchlasswiderstand jedes Scheibenzwischenraumes der Verglasung
- Exponent der Verglasung
- Strahlungsreflexionsgrad der Verglasung
- Strahlungstransmissionsgrad der Verglasung
- von Schmutz absorbierten Strahlungsanteil
- Durchlässigkeit der Jalousie für diffuse Strahlung
- Durchlässigkeit der Jalousie für direkte Strahlung
- Verschattung durch äußeren Sturz oder Laibung (geometriebedingt)

#### Bauteilbezogen - Allgemein

- Bauteil-Kennung (Außen-, Innenbauteil, Glas, etc.)
- Bauteil-Lage (Wand, Boden, Decke, etc.)
- Bauteilfläche
- Azimut der Flächennormale für die Außenseite jedes Bauteils

- Neigung der Flächennormale für die Außenseite jedes Bauteils
- Wärmeübergangskoeffizienten konvektiv und radiativ
- Verschattung durch Umgebung (Prozentuell im zeitlichen Verlauf)

### **Raum- bzw. Nutzungsbezogen**

- Fugenluftwechselzahl
- additiver Luftwechsel (Luftwechselzahl im zeitlichen Verlauf)
- ggf. Luftwechsel mit Nachbarräumen
- ggf. Innentemperaturverlauf eines Nachbarräumes
- Flächen der Lüftungsöffnungen (natürliche Lüftung)
- Flag für Jalousiebenutzung (Außenraum)
- Volumenbezogene Wärmekapazität der Luft
- Fugenluftwechselzahl
- zeitlicher Verlauf der Fensterlüftung
- Höhendifferenz zwischen 2 Lüftungsöffnungen
- Höhe der Lüftungsöffnung
- Wärmeabgabeleistung einer Person
- Jalousiebenutzung von
- Jalousiebenutzung bis
- zeitlicher Verlauf der Personenbelegung
- Raumvolumen
- Verschattungsfaktor
- zeitlicher Verlauf der Innenwärmen
- Zahl der Lüftungsöffnungen mit Höhendifferenz
- Zahl der Lüftungsöffnungen ohne Höhendifferenz
- Solarer Verlustfaktor - Reflexionsgrad des Raumes
- Verteilung der internen Wärmegewinne auf Luft und Oberflächen (Konvektion, Strahlung), z. B. abhängig von Möblierung
- Verteilungsfaktoren auf Bauteile (einfallende kurzwellige Solarstrahlung, unterschieden zwischen Direkt- und Diffusstrahlung)

### **Klima- bzw. Umgebungsbezogen**

- Leistenverschattung für alle Außenräume
- Horizontüberhöhung durch Azimut und Überhöhungswinkel

- zeitlicher Verlauf der Verschattung für alle Außenräume/transparen-  
transparenten Außenflächen
- Angabe zur Bewölkung
- Reflexionszahl der Umgebung (Albedo) oder Vorgabe von  
Tagesgängen der „Umgebungstemperaturen“, d. h. der Ober-  
flächentemperaturen der das Gebäude umgebenden terrestrischen Umgebungen
- Diffusstrahlungsfaktor nach Reitz (ggf. Tagesgang)
- Trübungsfaktor nach Linke (ggf. Tagesgang)
- Temperatur des Erdbodens
- Geografische Breite, Grad
- Geografische Breite, Minuten
- Geografische Länge, Grad
- Geografische Länge, Minuten
- Jahreszeit
- Datum
- Seehöhe
- Tagesminimum und Tagesmaximum oder Tagesmittelwert  
und Tagesschwankung oder Tagesgang der Außentempera-  
tur
- Bestrahlungsstärken auf jede Orientierung werden aufgrund  
des Datums und der geografischen und atmosphärischen An-  
gaben berechnet (direkt und diffus) oder können in Stunden-  
werten vorgegeben werden
- Anzahl der Harmonischen
- Meridian der Zeitzone
- Volumenbezogene spezifische Wärmekapazität der Luft im  
Innenraum

## 2.6 Instationäre Wärmeleitung, Wärmespeicherung

Die Simulation des thermischen Verhaltens von Räumen und/oder Gebäuden erfordert immer auch die Aufstellung und Lösung der Wärmeleitungsgleichung. Bei sich zeitlich verändernden Randbedingungen (Temperatur, Solarstrahlung, interne Wärmequellen, etc.) ist es erforderlich, den Wärmetransport durch ein Bauteil unter Berücksichtigung des Wärmespeicherterms zu berechnen. Es wird auch an dieser Stelle

wieder vereinfacht die eindimensionale Wärmeleitungsgleichung (ohne Wärmequellen) gemäß Gleichung 2.32 herangezogen.

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( \lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (2.32)$$

Die Lösung der Wärmeleitungsgleichung ist im allgemeinen Fall nur unter der Vorgabe von Rand- und Anfangsbedingungen möglich. Die Randbedingungen sind in Form von Zeitverläufen der Temperatur, der Sonneneinstrahlung und von nutzungsbedingten Wärmequellen grundsätzlich bekannt bzw. vorzugeben. Unter Anfangsbedingungen werden hingegen nicht nur die Vorgaben von Randbedingungen zu einem gewissen Zeitpunkt – zum Beginn der Simulation – verstanden sondern auch die Vorgabe einer Temperaturverteilung innerhalb der gesamten Baukonstruktion. Genügend Information über diese Temperaturverteilung ist im Normalfall nicht vorhanden, sodass Anfangsbedingungen üblicherweise mehr oder weniger gut erfunden werden müssen. Da die Wärmeleitungsgleichung die Eigenschaft besitzt, dass der Einfluss der Anfangsbedingungen auf das Ergebnis mit fortschreitender (Simulations-)Zeit immer kleiner wird, kann dem Problem der unbekanntenen Anfangsbedingungen insofern wirkungsvoll begegnet werden, als die Simulation ab dem Anfangszeitpunkt für eine gewisse Zeit durchgeführt wird, ohne die Ergebnisse auszuwerten. Man spricht in diesem Zusammenhang von der „Einlaufphase“ der Simulation. Problematisch bei dieser für thermische Simulationen charakteristischen Eigenart ist der Umstand, dass die Dauer der Einlaufphase – also die Dauer des Abklingens der Anfangsbedingungen – stark von der Art und der Bauweise des Gebäudes abhängt und nicht von vornherein bekannt ist. Bei leichten und mittelschweren Bauweisen wird es genügen, das Simulationsprogramm über Wochen oder einen Monat einlaufen zu lassen. Bei schweren und sehr schweren Bauweisen, wie z. B. Altbestand oder sakralen Bauwerken, kann die Einlaufphase auch in der Größenordnung von einem Jahr oder mehr liegen.

Die Lösung der Wärmeleitungsgleichung wird in der Regel durch numerische Verfahren (z. B. finite Differenzverfahren) möglichst gut angenähert (siehe dazu auch Abschnitt 3.3) und muss bei instationärer Untersuchung für jeden Zeitschritt (z. B. stündlich) aufgestellt werden. Die einzige Möglichkeit, die Wärmeleitungsgleichung exakt zu lösen, ist unter Verwendung des eindimensionalen und periodisch eingeschwungenen Verfahrens gegeben. Dabei werden die zeitlichen Verläufe periodisch angesetzt, weshalb auch die zuvor angeführte Problematik der unbekanntenen Anfangsbedingungen umgangen wird. In Abschnitt 2.7.2.2 wird diese „harmonische“ Methode anhand der Wärmebilanzierung eines Raumes detailliert erklärt. Dabei eignet sich z. B. die Ta-



gesperiode für die Berechnung der sommerlichen Überwärmung von Räumen sehr gut, da das periodische Ansetzen eines heißen Sommertages dem Ende einer Hitzeperiode nahe kommt (kritischer Fall). Ausgenommen von dieser Überlegung sind bereits zuvor angeführte, sehr schwere Bauweisen, wie sakrale Massivbauten, bei welchen auch die Langzeitspeicherung große Auswirkungen zeigt. Die massive, teilweise meterdicke Gebäudehülle muss dann als „saisonaler Wärmespeicher“ angesehen werden, dessen Auswirkungen bei einer Simulation mit Tagesperiode nicht abgebildet werden können.

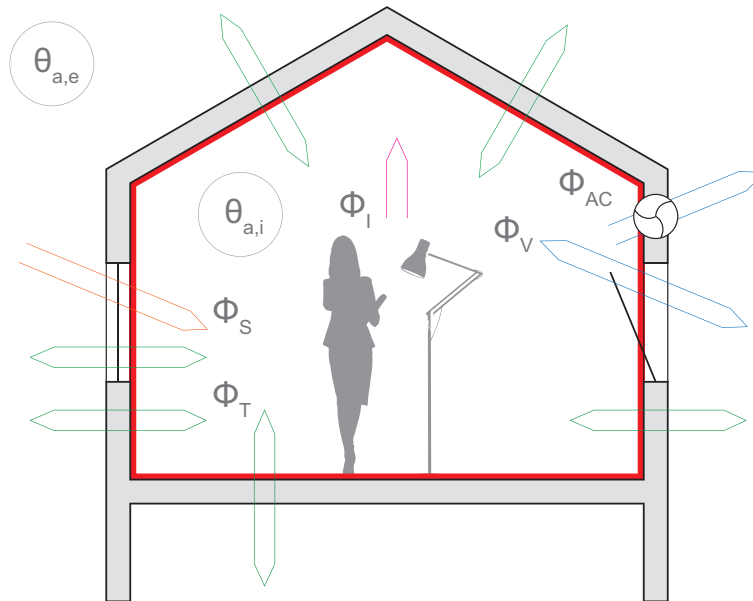
## 2.7 Energiebilanz

Die Simulation des thermischen Verhaltens von Räumen und/oder Gebäuden erfordert immer die Aufstellung und Lösung von Wärmebilanzgleichungen.

### 2.7.1 Stationäre Lösung

Bei stationärer, also zeitunabhängiger Betrachtung, gleichen sich die Wärmeverluste und die Wärmegewinne aufgrund der Energieerhaltung aus, wie in der stationären Wärmebilanzgleichung 2.33 ersichtlich. In Abbildung 2.16 werden die Komponenten der Gleichung grafisch dargestellt. Bei der stationären Wärmebilanzgleichung sind auf linker Seite die Transmissionswärmeverluste und Lüftungswärmeverluste den Wärmegewinnen auf rechter Seite gegenübergestellt (Wärmegewinne durch solare Einstrahlung, nutzungsbedingte Wärmegewinne und Wärmegewinne durch Heizung). Die Bezeichnung „Wärmeverluste“ entstammt dem Berechnungsmodell für das winterliche Raumverhalten, für das vereinfachte Gleichung 2.33 natürlich ungeändert gilt. Im Sommerfall wird es vorkommen, dass – je nach Zeitpunkt der Betrachtung – durch Transmission und/oder Lüftung Wärmegewinne auftreten. Dies macht insofern kein Problem als durch die Bezeichnung „Wärmeverluste“ lediglich festgelegt wird, dass Wärmeströme vom Raum nach außen hin positiv gezählt werden. Wärmegewinne fließen in die Gegenrichtung und erhalten ein negatives Vorzeichen. Im Sommerfall fällt auch der Wärmestrom aufgrund Heizung weg oder wird zu einem Wärmeverlust durch Raumkühlung. Ein vereinfachtes Verfahren zur Abschätzung der Innenlufttemperatur anhand dieser einfachen, stationären Wärmebilanzgleichung wird in Abschnitt 3.2.1 vorgestellt.

$$L_T \cdot (\Theta_i - \Theta_e) + L_V \cdot (\Theta_i - \Theta_e) = \Phi_s + \Phi_i + \Phi_h \quad (2.33)$$



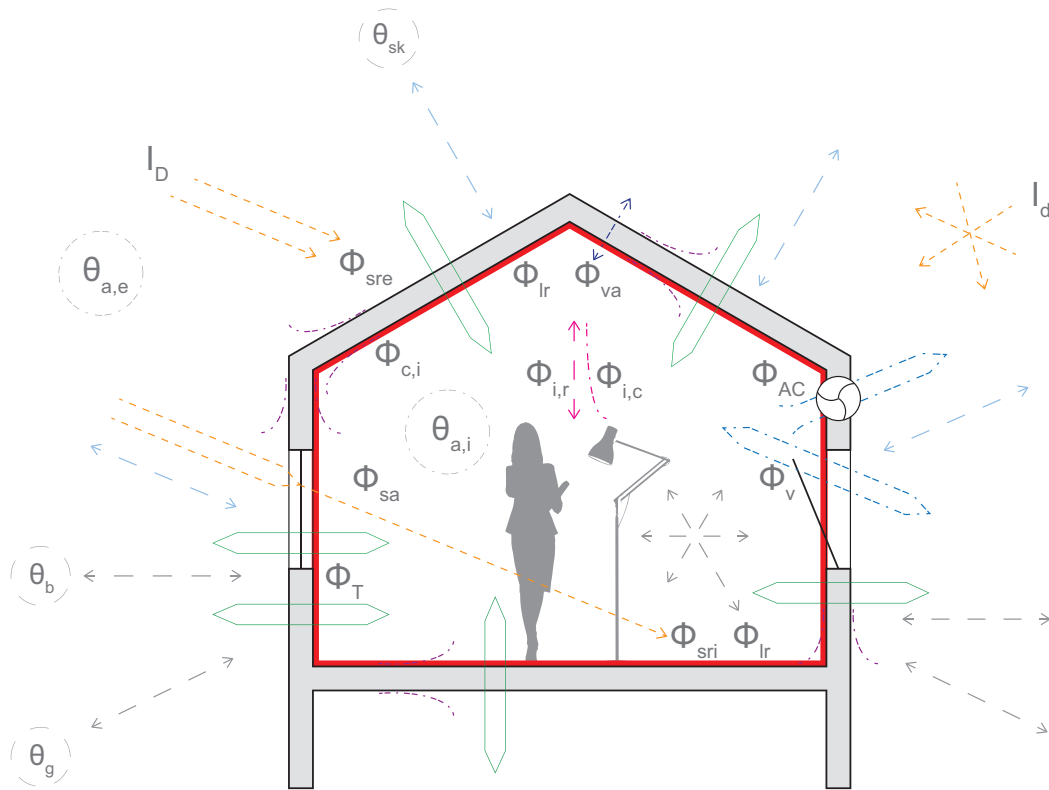
**Abbildung 2.16:** Einfache stationäre Energiebilanz eines Raumes im Sommerfall.

### 2.7.2 Instationäre Lösung

Um instationäres Verhalten, wie sich zeitliche ändernde thermische Randbedingungen, sich änderndes Lüftungsverhalten, sowie variable innere Wärmelasten und -verluste und somit auch instationäre Wärmeleitung und damit Wärmespeicherung analysieren zu können, muss der Faktor Zeit berücksichtigt werden. Dabei gibt es zum Lösen der Bilanzgleichungen die Möglichkeit der Verwendung eines sogenannten Zeitschrittverfahrens, bei welchem die Gleichungen für jeden Zeitschritt gelöst werden müssen, oder jedoch die Möglichkeit der Verwendung einer analytischen Methode im Frequenzbereich, dem periodisch eingeschwungenen Verfahren. Die beiden Arten der Lösung der Bilanzgleichungen bei instationärem Verhalten werden folgend beschrieben (siehe dazu auch Abschnitt 3.3).

#### 2.7.2.1 Zeitschrittverfahren

Die thermische Bilanzierung mittels Zeitschrittverfahren soll anhand der europäischen Norm EN ISO 13791 [93] (siehe Abschnitt 3.1.4) folgend kurz umrissen werden. Nach der EN ISO 13791 setzen sich die Gleichungen für die Wärmebilanz eines Raumes aus Komponenten zusammen, die folgend aufgelistet und in Abbildung 2.17 veranschaulicht



**Abbildung 2.17:** Energiebilanz eines Raumes im Sommerfall angelehnt an die EN ISO 13791.

werden:

- Wärmeleitung durch Bauteile
- Konvektive Wärmeübertragung
- Wärmeübertragungsvorgänge durch kurzwellige Strahlung
- Wärmeübertragung durch langwellige Strahlung
- Innere Wärmegewinne
- Wärmestrom durch Lüftung

Für jeden Zeitschritt (z. B. stündlich) werden simultan für alle Innenflächen (Gleichung 2.35), sowie für die Raumluft (Gleichung 2.34), Gleichungen aufgestellt und gelöst. Aus der Lösung der Systemgleichungen können die Temperaturen der Innenflächen jedes Bauteils des umbauten Raumes und die Innenlufttemperatur bestimmt werden. Genannte Gleichungen und verwendete Ausdrücke werden in der EN ISO 13791:2012 beschrieben. In Anhang A der Norm wird zudem die Herangehensweise zu einem Lösungsverfahren (Zeitschrittverfahren) vor-

gestellt.

$$\sum_{j=1}^N (A \cdot q_{c,i})_j + \Phi_v + \Phi_{i,c} + \Phi_{sa} + \Phi_{va} = c_a \cdot \rho_a \cdot V_{a,i} \cdot \frac{\partial \theta_{a,i}}{\partial t} \quad (2.34)$$

$N$	Anzahl der die Raumlufte begrenzenden Innenflächen
$A$	Fläche der einzelnen Bauteile
$q_{ci}$	Dichte des Wärmestroms durch Konvektion
$\Phi_v$	Lüftungswärmestrom
$\Phi_{i,c}$	konvektiver Anteil des Wärmestroms durch innere Wärmequellen
$\Phi_{sa}$	Wärmestrom durch den solaren Wärmegewinn in der Luft
$\Phi_{va}$	Wärmestrom infolge der durch Luftschichten innerhalb der Raumbegrenzungs-elemente in den Raum eintretenden Luft
$c_a$	spezifische Wärmekapazität der Luft
$\rho_a$	Volumen der Raumlufte
$V_{a,I}$	Masse der Raumlufte
$\theta_{a,I}$	Temperatur der Raumlufte
$t$	Zeit

$$q_{lr,j} + q_{sr,j} + q_{c,j} + q_{cd,j} + \frac{\Phi_{i,r}}{\sum_{j=1}^N A_j} = 0 \quad (2.35)$$

$q_{lr}$	Dichte des Wärmestroms durch den Austausch langwelliger Strahlung mit anderen Innenflächen
$q_{sr}$	Dichte des Wärmestroms durch die absorbierte kurzwellige Strahlung
$q_c$	Dichte des durch Konvektion an die Raumlufte abgegebenen Wärmestroms
$q_{cd}$	Dichte des Wärmestroms durch Leitung
$\Phi_{i,r}$	Wärmestrom durch den Strahlungsanteil der inneren Wärmegewinne
$N$	Anzahl der die Raumlufte begrenzenden Oberflächen
$A_j$	Fläche des Raumelements $j$

### 2.7.2.2 Periodisch eingeschwungenes Verfahren

Die im Abschnitt 2.6 angeführte Problematik der unbekanntenen Anfangsbedingungen kann umgangen werden, indem postuliert wird, dass alle zeitlichen Verläufe periodisch sind, sich also nach einer gewissen Zeit – der Periodenlänge – wiederholen.

In diesem Spezialfall können sämtliche Zeitverläufe durch sogenannte Fourier-Reihen dargestellt werden. Um die hier zu beschreibenden Zusammenhänge einfach zu halten, wird im Folgenden ausgiebig von der komplexen Arithmetik Gebrauch gemacht. Eine Fourier-Reihe hat in komplexer Schreibweise folgendes Aussehen:

$$f(x, t) = \frac{1}{2} \cdot \sum_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}_v(x) \cdot e^{j \frac{2 \cdot \pi \cdot v \cdot t}{T}} \quad (2.36)$$

Der periodisch eingeschwungene Zeitverlauf wird somit in eine Reihe von komplexwertigen Funktionen der Bauart

$$\hat{f}_v(x) \cdot e^{j \cdot \frac{2\pi \cdot v \cdot t}{T}} \quad (2.37)$$

entwickelt. Der Index  $v$  kennzeichnet die sogenannte Harmonische<sup>19</sup>.  $\hat{f}_v(x)$  ist die komplexwertige Amplitude der Funktion  $f(x, t)$  zur  $v$ -ten Harmonischen,  $T$  ist die Periodenlänge und  $t$  die Zeit. Mit  $j$  wird in Gleichung 2.37 die imaginäre Einheit gekennzeichnet.

Die Reihenentwicklung gemäß Ansatz 2.36 kann in der Realität natürlich nicht von  $-\infty$  bis  $\infty$  durchgeführt werden. Je nach Form der nachzubildenden Zeitfunktionen kann die Entwicklung meist schon nach einigen, wenigen Harmonischen abgebrochen werden. Es gibt jedoch auch eine Obergrenze für die Anzahl der Harmonischen, wenn die Zeitfunktionen durch Werte an  $N$  verschiedenen äquidistanten Zeitpunkten vorgegeben werden. In diesem Fall macht es nur einen Sinn, wenn die Summation über  $v$  in Gleichung 2.36 von  $-\frac{N}{2}$  bis  $\frac{N}{2}$  geführt wird. In diesem Fall führt die Zerlegung der Zeitfunktion in eine Fourier-Reihe (Fourier-Analyse) und eine Rücktransformation dieser Reihe in die Zeitfunktion (Fourier-Synthese) an den Stützwerten auf exakte Übereinstimmung mit den ursprünglich vorgegebenen Werten; man spricht in diesem Fall von Fourier-Interpolation [45]. Da bei der Tagesperiode die Definition von zeitlichen Verläufen zumeist über die Eingabe von 24 Momentanwerten zu den vollen Stunden erfolgt, erweist es sich als sinnvoll, die Reihenentwicklung 2.36 nur von  $v=-12$  bis  $v=12$  durchzuführen<sup>20</sup>. Eine weitere Erhöhung der Anzahl der Harmonischen bringt in diesem Fall keine Verbesserung der Genauigkeit.

Im Falle der Simulation des thermischen Verhaltens von Räumen und/oder Gebäuden unter periodisch eingeschwungenen Verhältnissen hat die Wärmebilanzgleichung für einen Raum folgende Struktur:

$$\hat{\Phi}_V^A + \hat{\Phi}_V^I + \hat{\Phi}_V^L = \hat{\Phi}_G^S + \hat{\Phi}_G^P + \hat{\Phi}_G^B + \hat{\Phi}_G^H \quad (2.38)$$

In der Bilanzgleichung sind wie bei der stationären Version die Wärmeverluste – Index V – (linke Seite, unten) den Wärmegewinnen – Index G – (rechte Seite, unten) gegenüber gestellt. Gleichung 2.38 zeigt, dass für jede Harmonische die Summe der komplexen Amplituden der

<sup>19</sup>Eine Harmonische ist in der klassischen Physik und Technik eine harmonische Schwingung, deren Frequenz ein ganzzahliges Vielfaches einer Grundfrequenz ist.

<sup>20</sup>Da die Amplitude  $\hat{f}_{-v}(x)$  immer komplex konjugiert zur Amplitude  $\hat{f}_v(x)$  ist, sind für eine Fourier-Analyse bei Vorgabe von Stützwerten zu 24 Zeitpunkten im Rahmen einer Fourier-Interpolation 12 Harmonische ( $v=1,12$ ) und die nullte Harmonische ( $v=0$ ), insgesamt also 13 Harmonische zu berechnen. Die nullte Harmonische liefert den zeitlichen Mittelwert  $\bar{f}_v(x)$  der Funktion in der Form  $\bar{f}_v(x) = \frac{f_0(x)}{2}$ . Dabei ist  $\bar{f}(x)$  eine reelle Zahl und ergibt sich aus der stationären Berechnung.

Wärmeverluste exakt gleich groß sind wie jene der Wärmegewinne. Die Effekte der Wärmespeicherung sind hierbei natürlich berücksichtigt.

Ersichtlich ist die Wärmebilanzgleichung 2.38 eine lineare Gleichung mit komplexwertigen Koeffizienten. Diese Gleichung ist für jede Harmonische aufzustellen und zu lösen<sup>21</sup>.

Da sich der Rechenkern Geba, der im Zuge der Arbeit entwickelten Programmoberfläche *Thesim3D*, der periodisch eingeschwungenen Simulation bedient, erscheint eine genauere Beschreibung dieses Lösungsverfahrens wichtig. Die in Geba verwendeten Berechnungsalgorithmen sind übersichtsmäßig in [40] dokumentiert und beruhen u. a. auf dem Konzept der Bauteilmatrizen (siehe [43]). Da die Formulierung der Wärmebilanzgleichung unter Verwendung des erst sehr viel später entwickelten Konzepts der thermischen Leitwerte (siehe [63], [62] und [64]) deutlich einfacher ist, wird dieses hier zur Erklärung heran gezogen.

Im Folgenden wird auf die Bedeutung und die Art der Berechnung jeder einzelnen der in Gleichung 2.38 vorkommenden Komponenten genauer eingegangen. Im Zuge dieser detaillierteren Behandlung wird u. a. klar, welche Größen durch Lösung der Gleichungen 2.38 errechnet werden können und welche Größen im Zuge von Vorwegberechnungen oder Datenerhebungen bereitgestellt werden müssen. Letztendlich ergeben sich aus dieser Diskussion unmittelbar die Anforderungen an die Programmoberfläche *Thesim3D*.

**WÄRMEVERLUSTE** stehen auf der linken Seite der Wärmebilanzgleichung 2.38 und sind durch den Index V gekennzeichnet. Sie setzen sich aus Transmissionswärmeverlusten (Indizes A und I, oben) und Lüftungswärmeverlusten (Index L, oben) zusammen.

**Transmissionswärmeverluste** sind Wärmeströme, die durch die raumbegrenzenden Bauteile abfließen, wodurch dem Raum Wärme entzogen wird. Als Wärmetransportmechanismus tritt die Wärmeleitung auf<sup>22</sup>. Bei instationärer Betrachtung treten Wärmeverluste selbst dann auf, wenn auf der abgewandten Seite einer Baukonstruktion die gleichen Temperaturen auftreten wie im interessierenden Innenraum. Dies bedeutet, dass in Hinblick auf die

---

<sup>21</sup> Auf das Einfügen des Index  $v$  bei jeder der in Gleichung 2.38 vorkommenden Größen wurde aus Gründen der besseren Lesbarkeit verzichtet.

<sup>22</sup> Bei Vorliegen von Luftschichten im Bauteil (wie z. B. bei einer Mehrfachverglasung oder einer abgehängten Decke) erfolgt der Wärmetransport hingegen hauptsächlich mittels Wärmestrahlung und Konvektion. Dieser Problematik wird jedoch üblicherweise derart begegnet, dass für die Luftschicht eine thermisch äquivalente Ersatzschicht konstruiert wird, deren Wärmeleitfähigkeit derart angesetzt wird, dass der Durchlasswiderstand übereinstimmt. Bezüglich des instationären Verhaltens einer Luftschicht kann in guter Näherung angenommen werden, dass diese keine Wärmespeicherfähigkeit besitzt.

Transmissionswärmeverluste nicht nur jene über raumbegrenzende Außenbauteile sondern auch jene über Innenbauteile in die Bilanzierung einfließen müssen. Es ist somit notwendig, sowohl Außen – als auch Innenbauteile zu berücksichtigen und diese getrennt in die Bilanzgleichung 2.38 einzuführen. Formal wurde dies durch Einführung der Indizes A und I erledigt.

**Durch Außenbauteile** sind die Transmissionswärmeverluste gemäß Formel 2.39 zu ermitteln.

$$\hat{\Phi}_V^A = - \sum_a^{AR} (\tilde{L}_{z,z}^a \cdot \hat{\Theta}_z + \tilde{L}_{z,n}^a \cdot \hat{\Theta}_a^r) \quad (2.39)$$

Zu summieren ist in Gleichung 2.39 über die sogenannten „Außenräume“. Diese sind durch unterschiedliche „Strahlungslufttemperaturen“ gekennzeichnet. Die komplexen Amplituden dieser Temperaturverläufe sind in Gleichung 2.39 mit  $\hat{\Theta}_a^r$  bezeichnet.

Die Strahlungslufttemperaturen sind fiktive Temperaturen, die neben der Außenlufttemperatur auch den Einfluss der Sonneneinstrahlung und des langwelligen Strahlungsaustauschs der äußeren Oberfläche des Außenbauteils mit der terrestrischen Umgebung und mit dem Himmel erfassen.

Zumeist wird der Einfluss der Sonneneinstrahlung und des langwelligen Strahlungsaustauschs an der Außenseite der Außenbauteile mittels Bilanzierung der Wärmeströme erfasst. In Gebäuden werden diese Einflüsse vorab mittels Berechnung von Tagesgängen der Strahlungslufttemperatur ermittelt, was zu einer ganz erheblichen Vereinfachung der Berechnungsansätze führt. Das Konzept der Strahlungslufttemperaturen wird in [57] tiefgehend analysiert und diskutiert. Neben der Außenlufttemperatur beeinflusst die Sonneneinstrahlung auf die Außenseite eines Außenbauteils die Strahlungslufttemperatur erheblich. Bereits daraus ergibt sich die Notwendigkeit, Außenbauteile getrennt nach ihrer Orientierung zu behandeln. Da auch die Absorptionszahl für Sonneneinstrahlung die an der äußeren Oberfläche von Außenbauteilen auftretenden Wärmequellen maßgeblich mitbestimmen, muss – bei gleicher Orientierung – zumindest zwischen transparenten und opaken Bauteilen unterschieden werden. Eine Erhöhung der Genauigkeit ergäbe sich, wenn z.B. die opaken Bauteile nach ihrer Farbe weiter aufgliedert werden. Da dies zu hohem Aufwand für den Benutzer führt und das Berechnungsergebnis im Nor-

malfall nicht wesentlich beeinflusst, wird aber eine solch detaillierte Eingabe kaum vorkommen. Zusammenfassend ergibt sich die Anzahl  $AR$  der verschiedenen Tagesgänge der Strahlungslufttemperaturen bzw. der verschiedenen „Außenräume“ aus der Anzahl unterschiedlicher Fassadenorientierungen, sowie aus der Unterscheidung zwischen transparenten und opaken Außenbauteilen. Zudem treten bei transparenten Bauteilen weitere Außenräume auf, wenn bei gleicher Orientierung verschiedene Glasarten verwendet werden oder wenn die Verschattung (z. B. aufgrund eines über einer Fenstertür auskragenden Balkons) eine andere ist.  $\hat{\Theta}_z$  in Gleichung 2.39 ist die komplexe Amplitude der Lufttemperatur im interessierenden Raum, der in der Folge mit dem Index  $z$  gekennzeichnet ist.

Der Index  $z$  wurde in der allgemeinen Formulierung der Bilanzgleichung 2.38 zwecks Wahrung einer guten Lesbarkeit nicht angeschrieben. Er würde bei allen Komponenten der Gleichung 2.38 aufscheinen und dient dazu, im Falle eines Mehrzonen-Modells die zu bilanzierenden Räume zu unterscheiden. Bei einem Mehrzonen-Modell wird Gleichung 2.38 für jeden Raum formuliert und das so entstehende Gleichungssystem gelöst. Bei der Berechnung der Transmissionswärmeverluste wird die Nennung des Index  $z$  insofern wichtig, als zwischen den harmonischen thermischen Leitwerten  $\tilde{L}_{z,z}$  und  $\tilde{L}_{z,n}$  unterschieden werden muss – siehe die folgenden Ausführungen.

Als Proportionalitätsfaktoren zwischen den komplexen Amplituden der Transmissionswärmeverluste und jenen der Lufttemperaturen treten in Gleichung 2.39 harmonische thermische Leitwerte  $\tilde{L}$  auf. Diese Leitwerte können im allgemeinen Fall einer beliebig zusammengesetzten Baukonstruktion beliebiger Form mittels eines geeigneten Wärmebrückenprogramms errechnet werden (thermisch dreidimensionales Modell). Da Geba – wie fast alle thermischen Gebäudesimulationsprogramme – thermisch eindimensional modelliert, soll hier nur auf diesen Fall eingegangen werden. Im thermisch eindimensionalen Fall ist der Wärmefluss durch einen Bauteil mit nur einer kartesischen Koordinate beschreibbar. Die Wärme fließt immer senkrecht zur Oberfläche des grundsätzlich plattenförmigen Bauteils. Nur in diesem Spezialfall können die harmonischen thermischen Leitwerte analytisch berechnet werden. Bei plattenförmigen Bauteilen gibt es immer nur zwei angrenzende Räume („innen“ und „außen“). Dem Raum „innen“ ist da-



bei die komplexe Amplitude  $\hat{\Theta}_z$ , dem Raum „außen“ die komplexe Amplitude  $\hat{\Theta}_a^r$  der Strahlungslufttemperatur des jeweiligen Außenraumes  $a$  zugeordnet. Die stationären und instationären thermischen Eigenschaften eines homogen geschichteten, plattenförmigen Bauteils werden durch Matrizen von harmonischen thermischen Leitwerten vollständig beschrieben. Für jede Harmonische existiert eine symmetrische 2x2-Matrix (bei 1 Innen- und 1 Außenraum); deren komplexwertige Elemente müssen im Rahmen einer Vorwegberechnung ermittelt werden. Am einfachsten erfolgt die Ermittlung der Elemente der Matrix harmonischer thermischer Leitwerte eines plattenförmigen Bauteils durch Berechnung der Bauteilmatrizen und darauffolgender Transformation der Bauteilmatrizen in Leitwertmatrizen.

Da bei thermisch eindimensionaler Modellierung die Flächen der plattenförmigen Bauteile eindeutig ermittelbar sind, macht es Sinn flächenbezogen zu rechnen. Die Berechnung von Bauteilmatrizen zur Charakterisierung des thermischen Verhaltens plattenförmiger, homogen geschichteter Aufbauten ist seit langem Stand der Technik und wird in [43] aus der Wärmeleitungsgleichung abgeleitet und tiefgehend analysiert. Mittlerweile hat dieser Berechnungsansatz Eingang in die internationale Normung [97] gefunden. Der Berechnung von Bauteilmatrizen liegt folgender Ansatz zugrunde:

$$\begin{pmatrix} \hat{\Theta}_z \\ \hat{q}_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{Z}_{a,a} & \tilde{Z}_{a,z} \\ \tilde{Z}_{z,a} & \tilde{Z}_{z,z} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \hat{\Theta}_a \\ \hat{q}_a \end{pmatrix} \quad (2.40)$$

Der Zusammenhang zwischen den komplexen Amplituden von Lufttemperatur  $\hat{\Theta}_z$  und Wärmestromdichte  $\hat{q}_z$  an der Innenseite eines Bauteils und den entsprechenden Größen  $\hat{\Theta}_a$  und  $\hat{q}_a$  an der Außenseite des Bauteils wird durch die Bauteilmatrix ( $\tilde{Z}$ ) vermittelt.

Bei der von Geba eingeschlagenen Vorgangsweise tritt bei Außenbauteilen an Stelle der komplexen Amplitude der Lufttemperatur auf der raumabgewandten Seite des Bauteils  $\hat{\Theta}_a$  die Strahlungslufttemperatur des Außenraumes  $\hat{\Theta}_a^r$ .

Die Berechnungsansätze zur Ermittlung der Bauteilmatrizen sind in Abschnitt 3.2.2 angeführt oder können in der EN ISO 13786 [97] unter dem Begriff Wärmeübergangsmatrix<sup>23</sup> nach-

<sup>23</sup>In der Norm wird die Bauteilmatrix als als Wärmeübergangsmatrix bezeichnet. Nach [67] ist das aber nicht treffend gewählt, da „Wärmeübergang“ für thermische Prozesse an

gelesen werden. Daraus kann abgeleitet werden, dass für jede in den Außenbauteilen des Raums auftretende Schicht folgende Größen erhoben werden müssen: Die Schichtdicke, die Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärmekapazität, die Massendichte, sowie die Wärmeübergangswiderstände an der Außen- und Innenseite. Zudem muss festgelegt werden, welche Periodenlänge der Simulation zugrunde zu legen ist. Für die Fragestellung der sommerlichen Raumüberwärmung ist die Tagesperiode (86400 s) anzusetzen.

Nach Vorliegen der Bauteilmatrizen für alle Außenbauteile ist es vorteilhaft, diese Matrizen in Leitwert-Matrizen zu transferieren. Den Zusammenhang zwischen den Bauteilmatrizen ( $\tilde{Z}$ ) und den Leitwertmatrizen ( $\tilde{Y}$ ) liefert folgender Zusammenhang:

$$\begin{pmatrix} \tilde{Y}_{a,a} & \tilde{Y}_{a,z} \\ \tilde{Y}_{z,a} & \tilde{Y}_{z,z} \end{pmatrix} = -\frac{1}{\tilde{Z}_{a,z}} \cdot \begin{pmatrix} -\tilde{Z}_{a,a}^B & 1 \\ 1 & \tilde{Z}_{z,z}^B \end{pmatrix} \quad (2.41)$$

Die Elemente der Matrix ( $\tilde{Y}$ ) sind – wie jene der Matrix ( $\tilde{Z}$ ) – flächenbezogen und müssen daher mit der Bauteilfläche multipliziert werden. Der Vorteil, ab diesem Punkt mit harmonischen thermischen Leitwerten zu arbeiten, liegt darin, dass der Leitwert einer aus mehreren verschiedenen Bauteilen bestehenden Fassade durch Summation der Teil-Leitwerte ermittelt wird. Die Summation von Teil-Leitwerten zu einem Gesamtleitwert entspricht dabei der Annahme einer thermischen Parallelschaltung. Die nach Gleichung 2.39 zur Berechnung der Transmissionswärmeverluste erforderlichen Gesamtleitwerte sind demnach gemäß

$$\begin{aligned} \tilde{L}_{z,z}^a &= \sum_k^K \tilde{Y}_{z,z,k} \cdot A_k^a \text{ bzw.} \\ \tilde{L}_{z,n}^a &= \sum_k^K \tilde{Y}_{z,n,k} \cdot A_k^a \end{aligned} \quad (2.42)$$

zu berechnen. Um die beiden Elemente der Matrix harmonischer thermischer Leitwerte berechnen zu können, müssen somit auch alle Bauteilflächen ( $A_k^a$ ) bekannt sein. Die Summen

---

den Bauteiloberflächen bereits besetzt ist. Auch in dieser Arbeit wird anstatt dessen die Bezeichnung Bauteilmatrix verwendet.

in den Gleichungen 2.42 sind über alle jene  $K$  Bauteile zu erstrecken, die den Innenraum  $z$  mit dem Außenraum  $a$  thermisch verbinden. Bei einer Fassade wären dies typischerweise die Außenwand, der Fensterrahmen und das Fensterglas. Mit dem Index  $k$  werden somit die zu einem Außenraum  $a$  gehörigen Außenbauteile durchnummeriert.

Der in den Gleichungen 2.39 und 2.42 auftretende Index  $n$  dient lediglich der Unterscheidung der Elemente der Leitwert-Matrix. Der harmonische thermische Leitwert  $\tilde{L}_{z,n}^a$  ist das Element in der Nebendiagonale der (symmetrischen) Leitwert-Matrix und kennzeichnet das thermische Verhalten bei schwankenden Außentemperaturen. Gemäß Gleichung 2.39 ist dabei als Außentemperatur die Strahlungslufttemperatur des Außenraumes mit dem Index  $a$  einzusetzen. Das Element  $\tilde{L}_{z,z}^a$  ist hingegen das zur Innenseite des Bauteils gehörige Element der Leitwert-Matrix in der Hauptdiagonale und beschreibt den Einfluss einer Lufttemperaturschwankung im zu bilanzierenden Raum mit dem Index  $z$ . Die Angabe des Index  $a$  ist auch in diesem Fall notwendig, da die Außenbauteile des Raumes  $z$  an verschiedene Außenräume grenzen können.

**Durch Innenbauteile** sind die Transmissionswärmeverluste gemäß Formel 2.43 zu ermitteln.

$$\hat{\Phi}_V^I = - \sum_i^{IR} (\tilde{L}_{z,z}^i \cdot \hat{\Theta}_z + \tilde{L}_{z,n}^i \cdot \hat{\Theta}_i^a) \quad (2.43)$$

Die Transmissionswärmeverluste durch Innenbauteile errechnen sich somit mit einem zu den Transmissionswärmeverlusten durch Außenbauteile analogen Ansatz.

Zur Berechnung der Transmissionswärmeverluste durch Innenbauteile werden zum einen die harmonischen thermischen Leitwerte  $\tilde{L}_{z,n}^i$  zwischen dem interessierenden Raum  $z$  und dem Nachbar-Innenraum mit dem Index  $n$  benötigt. Zum anderen müssen die komplexen Amplituden der Lufttemperatur im  $i$ -ten Raum  $\hat{\Theta}_i^a$  bekannt sein. Diese komplexen Amplituden werden mittels Fourier-Analyse des für Raum  $i$  vorgegebenen Temperaturgangs vorweg errechnet. Ist ein solcher Temperaturgang nicht bekannt, so kann geordnet werden, dass der Tagesgang der Lufttemperatur im Raum  $i$  mit einem – vorerst unbekanntem – Tagesgang der Lufttemperatur in einem Raum der zu bilanzierenden Raumgruppe identisch ist. In diesem Fall geht die komplexe Amplitude der Lufttemperatur als Un-

bekanntes in ein System von Gleichungen des Typs 2.38 ein und wird im Zuge der Berechnung ermittelt.

Speziell im Fall der Simulation nur eines Raumes („1-Zonen-Modell“) grenzen Innenbauteile zumeist gegen Räume, die sich identisch wie der gerade zu berechnende Raum verhalten sollen. Bei normgemäßen Sommertauglichkeitsberechnungen wird üblicherweise jener Raum zur Simulation ausgewählt, von dem zu erwarten ist, dass er die größte Überwärmungstendenz aufweist. Bezüglich der thermischen Verhältnisse in allen an diesen „kritischen“ Raum angrenzenden Innenräumen wird angenommen, dass diese sich gleich verhalten wie der simulierte Raum. Durch diese Annahme wird dem Berechnungsergebnis eine gewisse, in Norm-Berechnungen übliche Sicherheit zugeordnet.

Bezüglich der Berechnung der thermischen Leitwerte  $\tilde{L}_{i,k}^t$  gilt das für die Außenbauteile Gesagte. Es ist lediglich anzumerken, dass Innenbauteile gleichen Aufbaus nur dann gesondert behandelt werden müssen, wenn sie an Nachbarräume unterschiedlicher Temperatur grenzen. Ist dies nicht der Fall, so können die entsprechenden Bauteilflächen aufaddiert werden. So gehen z. B. Innenwände, die an verschiedene Nachbarräume gleicher Temperatur grenzen, als ein einziger Bauteil in die Berechnung ein.

**Lüftungswärmeverluste** sind gemäß

$$\Phi_V^L = + \sum_m^M \tilde{L}_{z,m}^V \cdot (\hat{\Theta}_z - \hat{\Theta}_m^a) \quad (2.44)$$

zu berechnen. Lüftungswärmeverluste sind grundsätzlich nur für jene Luftvolumenströme zu berücksichtigen, die dem interessierenden Raum  $z$  zugeführt werden. Luftvolumenströme, die aus Raum  $z$  nach außen oder in Nachbarräume abgeführt werden, beeinflussen das thermische Verhalten dieses Raumes nicht.

Die komplexen Amplituden  $\hat{\Theta}_m^a$  sind durch Fourier-Analyse des Tagesgangs der Temperaturen der dem Raum  $z$  aus dem Raum  $m$  zugeführten Luftvolumenströme zu ermitteln. Im Normalfall wird nur eine Lüftung mit Außen- (Frisch-)Luft vorkommen und die Summe in Gleichung 2.44 nur aus einem Term bestehen.  $\hat{\Theta}_m^a$  errechnet sich in diesem Fall durch Fourier-Analyse des (vorgegebenen) Tagesgangs der Außenlufttemperatur. Es sei hier jedoch erwähnt, dass es durch die allgemeine Formulierung in Gleichung

2.44 möglich ist, z. B. die Auswirkung der Zufuhr vorgekühlter Luft in den Raum  $z$  auf dessen thermisches Verhalten zu untersuchen. Auch die Lüftungswärmeverluste sind proportional zur Temperaturdifferenz. Der Proportionalitätsfaktor ist der Lüftungsleitwert  $\tilde{L}_{z,m}$ . Dieser ist abhängig vom Luftvolumenstrom der dem Raum zugeführten Luft und errechnet sich gemäß

$$L_{z,m}^V = c_L \cdot \rho_L \cdot \dot{V} \quad (2.45)$$

$c_L \cdot \rho_L$  ist die volumenbezogene Wärmekapazität der Luft und  $\dot{V}$  der Luftvolumenstrom. Wird  $\dot{V}$  in  $\text{m}^3\text{h}^{-1}$  angegeben, so ist für die spezifische Wärmekapazität  $c_L \cdot \rho_L$  gemäß EN ISO 13791 [93] der Wert  $0,319 \text{ Whm}^{-3}\text{K}^{-1}$  anzusetzen. Ersichtlich ergibt sich dann der Lüftungsleitwert in der Einheit  $\text{WK}^{-1}$ .

Der in Gleichung 2.45 angegebene Lüftungsleitwert ist eine reelle Konstante, der Luftvolumenstrom  $\dot{V}$  somit zeitunabhängig. Der wichtige Fall zeitlich variabler Lüftung (z. B. verstärkter Nachtlüftung) wird damit nicht erfasst. Bei Einführung einer variablen Lüftung geht die Linearität von Gleichung 2.38 verloren, womit die Anwendbarkeit der entwickelten Theorie für diese wichtigen Fälle in Frage gestellt wird. Für diesen Fall – und für ähnlich geartete Fragestellungen (wie z. B. den Fall natürlicher Lüftung bei geöffneten oder gekippten Fenstern) – kann jedoch eine Lösung gefunden werden, wenn iterativ vorgegangen wird. Bei variabler Lüftung werden in einem ersten Schritt die sich im Fall von konstantem Luftwechsel mit einem Luftvolumenstrom, der dem Tagesmittelwert der variablen Lüftung entspricht, ergebenden Amplituden der Raumlufttemperatur  $\hat{\Theta}_z$  errechnet. Mit dieser ersten Grobnäherung werden in einem zweiten Schritt die Lüftungswärmeverluste nach Gleichung 2.44 – nun mit dem zeitabhängigen Lüftungsleitwert – berechnet und die Wärmebilanzgleichung 2.38 erneut aufgestellt und gelöst. Ergebnis ist nun eine neue, bessere Näherung für die Amplitude  $\hat{\Theta}_z$ . Die skizzierte Vorgangsweise wird so lange wiederholt, bis die aus der komplexen Amplitude  $\hat{\Theta}_z$  mittels Fourier-Synthese errechneten Tagesgänge der Raumlufttemperatur von jenen des im vorhergehenden Iterationsschritt ermittelten Tagesgängen faktisch nicht mehr unterscheiden. Sobald sämtliche Momentanwerte der Temperatur sich von Iterationsschritt zu Iterationsschritt um weniger als  $0,001 \text{ K}$  verändern, wird in Geba die erhaltene Lösung als konsistent angesehen und die Iteration (erfolgreich) abgebrochen.

**WÄRMEGEWINNE** stehen auf der rechten Seite der Wärmebilanz-

gleichung 2.38 und sind durch den Index G gekennzeichnet. Sie setzen sich aus Wärmegewinnen, die sich aufgrund solarer Einstrahlung ergeben und jenen, die aufgrund der Raumnutzung auftreten, zusammen. Wird der Raum – im Winter – beheizt oder – im Sommer – gekühlt, so kommt als weiterer Term der Wärmegewinn durch Heizung bzw. der Wärmeentzug durch Kühlung dazu. Ein Wärmeentzug durch Kühlung scheint in Gleichung 2.38 als negativer Wärmegewinn auf. Zudem ist in diesem Fall anzumerken, dass die vorab festgesetzte oder per Bilanzierung errechnete Kühlleistung die sogenannte „sensible“<sup>24</sup> Kühlleistung ist.

Als Wärmegewinne werden hier nur die Heizleistungen bezeichnet, die in jenem Bereich, über den bilanziert wird, auftreten. Dieser Bereich ist definiert als das Volumen, das durch die raumbegrenzenden Bauteile des jeweils betrachteten Raumes eingeschlossen wird. Im Fall einer im Raum rein konvektiv wirkenden Wärmequelle wird 100 % der Heizleistung an die Raumluft abgegeben. Nur in diesem Fall gehen auch 100 % der Heizleistung der Wärmequelle in die Wärmebilanzgleichung 2.38 ein. Bei Wärmequellen, die ihre Wärme sowohl konvektiv als auch mittels Wärmestrahlung abgeben, fließt vorerst nur der konvektive Anteil in die Bilanzgleichung ein. In Hinblick auf die nutzungsbedingten Wärmequellen, wie sie durch die Personenbelegung aber auch die Abwärme von Leuchtkörpern und Geräten entstehen, wird der konvektiv abgegebene Anteil zumeist mit 50 % angesetzt. Aber auch im Fall der solaren Wärmegewinne gibt es einen konvektiven Anteil, wenn durch im Raum befindliche leichte Vorhänge eine direkte Übertragung der Wärme an die Raumluft ausgelöst wird.

Von Heizkörpern wird die Wärme zumeist sowohl konvektiv als auch mittels Wärmestrahlung an den Raum abgegeben. Bei Konvektoren wird die Wärme überwiegend konvektiv an die Raumluft abgegeben, bei Flächenheizungen überwiegt hingegen der Mechanismus des Strahlungsaustausches zwischen beheizten und unbeheizten Flächen. Bei Radiatoren variiert der konvektive Anteil je nach Art und Bauweise des Radiators in weiten Bereichen.

Sobald die Abgabe der Wärme einer Wärmequelle im Raum auch per Wärmestrahlung erfolgt, d. h. einen „Strahlungsanteil“ hat, trifft die von der Wärmequelle ausgehende Wärmestrahlung auf die inneren Oberflächen der raumbegrenzenden Bauteile auf. Aufgrund der auf-

---

<sup>24</sup>Zur sensiblen Kühlleistung kommt die sog. „latente“ Kühlleistung hinzu. Die Berechnung der latenten Kühlleistung erfordert Information über den Feuchtigkeitsgehalt in der Luft und wird hier nicht behandelt. Im Fall der Berechnung des sommerlichen Raumverhaltens ohne Einsatz von Kühlgeräten verschwindet der Kühlleistungsterm in Gleichung 2.38.

treffenden Strahlung bildet sich an der inneren Oberfläche eines jeden Bauteils eine flächenhafte Wärmequelle. Die Leistung dieser Wärmequelle ergibt sich durch Summation der solaren, der nutzungsbedingten und der durch die Heizung mittels Wärmeabstrahlung auftreffenden Strahlungsleistungen.

Die an den inneren Oberflächen der raumbegrenzenden Bauteile auftretenden flächenhaften Wärmequellen verursachen einen Wärmefluss, der dem Transmissionswärmefluss durch die Baukonstruktion überlagert ist. Zu einem Teil fließt Wärme von der Wärmequelle in den Bauteil und von dort in den Nachbarraum bzw. nach außen. Dieser Anteil an der Leistung der Wärmequelle geht verloren und beeinflusst das thermische Verhalten des betrachteten Raumes nicht. Zum anderen Teil fließt die Wärme von der Wärmequelle in den Raum zurück und tritt in diesem als Wärmegewinn auf. Dieser Anteil muss natürlich in der Wärmebilanzgleichung berücksichtigt werden. Wie in [62] gezeigt, sind die gesuchten Anteile von der Leistung der Wärmequelle unabhängig und können im periodisch eingeschwungenen Fall für jede Harmonische für beliebig zusammengesetzte Baukonstruktionen beliebiger Form berechnet werden. Die Gesamtheit dieser Anteile wird in [62] „Heizleistungsverteilungsschlüssel“ genannt.

**Berechnung des Heizleistungsverteilungsschlüssels:** Im thermisch eindimensionalen Fall besteht der Heizleistungsverteilungsschlüssel für jede Harmonische aus zwei Zahlen. Für die nullte Harmonische – also die stationäre Berechnung – sind diese beiden Zahlen reelle Größen, ansonsten sind sie komplexwertig. Die beiden Elemente des Heizleistungsverteilungsschlüssels sind im Spezialfall eindimensionaler Wärmeleitung analytisch berechenbar.

Jener Anteil der Wärmeleistung, der an der dem Raum zugewandten Oberfläche eines raumbegrenzenden Bauteils situierten Wärmequelle, der in den Raum zurück fließt, ist durch

$$\tilde{v}_{z,z} = 1 + \tilde{Y}_{z,z} \cdot R_{si} \quad (2.46)$$

gegeben.  $\tilde{v}_{z,z}$  ist ersichtlich eine dimensionslose, komplexwertige Zahl und ist für jede Harmonische zu berechnen. Im Spezialfall der 0-ten Harmonischen – also dem stationären Fall – ist  $\tilde{v}_{z,z}$  eine reelle Größe, die aufgrund der Beziehung  $Y_{z,z} = -U$  gemäß

$$v_{z,z} = 1 - U \cdot R_{si} \quad (2.47)$$

zu berechnen ist. In diesem Fall geht ein Anteil  $U \cdot R_{si}$  in die Wand.

(Nur) im stationären Fall ist die Summe der beiden Elemente des Heizleistungsschlüssels aufgrund der Energieerhaltung gleich Eins.

Natürlich darf nicht darauf vergessen werden, dass sich im Normalfall auch auf der raumabgewandten Seite der raumbegrenzenden Bauteile Wärmequellen befinden. Bei Außenbauteilen werden die Auswirkungen dieser Wärmequellen bereits durch die Verwendung des Konzepts der Strahlungslufttemperatur zur Gänze berücksichtigt.

Handelt es sich hingegen um einen Innenbauteil, so kommt jener Anteil der Wärmeleistung  $\tilde{v}_{z,n}$  der auf der raumabgewandten Seite befindlichen Wärmequelle, der in die Wand fließt dem betrachteten Raum zu und muss in die Wärmebilanzgleichung einfließen. Wird der Wärmeübergangswiderstand auf der raumabgewandten Seite eines raumbegrenzenden Bauteils mit  $R_{zn}$  bezeichnet, so errechnet sich der hier interessierende Teil  $\tilde{v}_{z,n}$  des Heizleistungsverteilungsschlüssels gemäß

$$\tilde{v}_{z,n} = 1 + \tilde{Y}_{z,n} \cdot R_{sn} \quad (2.48)$$

Im stationären Fall ist der Anteil  $v_{s,n}$  wegen  $Y_{z,n} = U$  durch

$$v_{z,n} = U \cdot R_{sn} \quad (2.49)$$

gegeben.

**Solare Wärmegewinne** sind Wärmequellen im Inneren von Gebäuden, die aufgrund der Sonneneinstrahlung durch die transparenten Teile der Gebäudehülle entstehen. In der hier besprochenen Version von Geba kommen transparente Bauteile nur in der Gebäudehülle, also als Außenbauteile, vor. Der Strahlungsdurchgang durch verglaste Innenbauteile, wie z. B. Glastüren, wird also nicht berücksichtigt.

Natürlich führt auch die solare Bestrahlung von opaken Bauteilen zu Wärmegewinnen. In Geba wird dieser, im Sommer nicht zu vernachlässigende Effekt, durch das Rechnen mit der Strahlungslufttemperatur als äußerer Randbedingung für alle Außenbauteile, berücksichtigt.

Die Ermittlung der solaren Wärmegewinne erfolgt über mehrere Berechnungsschritte, die Geba zum Großteil schon vor der Aufstellung der Wärmebilanzgleichungen abarbeitet. Diese Schritte werden im Folgenden schlagwortartig skizziert:

**Berechnung der solaren Bestrahlungsstärken:** Ausgangspunkt für die Berechnung der Innenwärmen aufgrund von Sonneneinstrahlung durch die transparenten Teile der Gebäudehülle ist die



Berechnung der solaren Bestrahlungsstärken, also jener flächenbezogenen Einstrahlleistungen, die auf der Außenseite der Außenbauteile auftreten. Da die solaren Bestrahlungsstärken auch in die Berechnung der Strahlungslufttemperaturen eingehen, sind diese für alle Außenbauteile, also auch für die opaken, zu ermitteln.

Grundlage für die Berechnung von solaren Bestrahlungsstärken ist die Kenntnis der Sonnenbahn. Hierfür muss zum einen das Datum festgelegt werden. Gemäß ÖNorm B8110-3 [92] ist für den Nachweis des normgemäßen sommerlichen Raumverhaltens der 15. Juli zu wählen. Geba kennt keine Einschränkungen in Hinblick auf die Setzung des Datums; Simulationen können somit für jeden Tag im Jahr durchgeführt werden.

Zum anderen erfordert die Berechnung der Sonnenbahn Angaben zum Gebäudestandort. In Geba fließt der Gebäudestandort über die Angaben der geografischen Koordinaten ein. Da in Hinblick auf diese Angaben keine Einschränkungen bestehen, kann für beliebige Standorte der Welt gerechnet werden. Innerhalb von kleinen Gebieten auf der Erde, wie z. B. das österreichische Staatsgebiet, ändert sich die Sonnenbahn von Standort zu Standort nur unwesentlich. Falls keine genauen Angaben zu den geografischen Koordinaten zur Hand sind, ist in solch einem Spezialfall das Rechnen mit einer „mittleren“ Sonnenbahn eine zulässige Näherung.

Die Berechnung der solaren Bestrahlungsstärken erfordert zudem eine Angabe zum anzunehmenden „Wetter“.

Für Zwecke der Bauphysik genügt es, das „Wetter“ – bzw. genauer: den Trübungsstatus der Atmosphäre – mittels dem Trübungsfaktor nach Linke, dem Diffusstrahlungsfaktor nach Reitz und der Reflexionszahl der Umgebung (Albedo) zu charakterisieren. In Geba wird zur Berechnung der Bestrahlungsstärke ein vereinfachtes physikalisches Modell verwendet, das in [44] dokumentiert ist und auch den diesbezüglichen Setzungen der ÖNorm B8110-3 zugrunde liegt.

Schließlich muss natürlich auch bekannt sein, wie die Fläche orientiert ist, für die Bestrahlungsstärken rechnerisch zu ermitteln sind. Um die Orientierung eindeutig angeben zu können, werden zwei Winkel verwendet: der Azimut und die Neigung der nach außen orientierten Flächennormale. Der Azimut wird von Norden aus im Uhrzeigersinn positiv gemessen, während die Neigung den Winkel zwischen der horizontalen Ebene und der Flächennormale bezeichnet.

Eine genügend genaue Berechnung der solaren Wärmegewinne er-

fordert die Kenntnis sowohl der Direkt – als auch der Diffusstrahlung auf alle transparenten Bauteile der Gebäudehülle in ihrem Tagesverlauf. Die Unterscheidung zwischen Direkt- und Diffusstrahlung ist notwendig, da die Strahlungsdurchlässigkeit von transparenten Bauteilen stark von der Einstrahlrichtung abhängig ist – siehe den folgenden Abschnitt. Als Ergebnis dieses Berechnungsschritts liegen die Tagesverläufe der solaren Bestrahlungsstärken auf alle verschieden orientierten transparenten Flächen der Gebäudehülle vor. Für eine ausreichend genaue Modellierung dieser Tagesgänge genügt es hierbei, die Bestrahlungsstärken zu den vollen Stunden zu berechnen.

**Berechnung des Strahlungsdurchgangs durch transparente Bauteile:** Nachdem die an der Außenseite der transparenten Bauteile der Gebäudehülle auftreffende solare Bestrahlungsstärke berechnet, bzw. bekannt ist, muss ermittelt werden, wie groß der Anteil der außen auftreffenden Strahlung ist, die „hinter“ dem transparenten Bauteil – also im Inneren des Raums – als Heizleistung wirksam wird. Dieser Anteil wird üblicherweise als Gesamtenergiedurchlassgrad („g-Wert“) bei der Produktdeklaration des Glases angegeben. Im Rahmen einer thermischen Simulation ist das Verwenden des g-Werts insofern nicht zielführend als die Berechnung der operativen Temperatur auch die Kenntnis der inneren Oberflächentemperaturen der transparenten Bauteile verlangt. Der g-Wert allein kann diese Information nicht liefern, sodass das Verwenden des g-Werts insbesondere bei hoch verglasten Räumen zu Ergebnissen führt, die dem Anspruch auf hohe Planungssicherheit nicht genügen. Die Berechnung des Strahlungsdurchgangs durch transparente Bauteile erfordert die Kenntnis sowohl der wärmetechnischen Eigenschaften (Glasdicken, Scheibenabstände, Gasfüllungen) als auch der optischen Eigenschaften der jeweiligen Verglasung. Aus diesen Angaben kann sowohl der resultierende Strahlungstransmissionsgrad  $\tau_s$  als auch die resultierenden Strahlungsabsorptionsgrade für alle vorkommenden Scheiben und Verschattungseinrichtungen berechnet werden. Grundsätzlich sind diese Größen von der Einfallrichtung der Sonne und damit vom Sonnenstand und der Orientierung der Empfangsfläche abhängig. Dies bewirkt auch, dass in Hinblick auf den Strahlungsdurchgang durch die transparenten Flächen zwischen Direkt- und Diffusstrahlung unterschieden werden muss.

Der Effekt der sog. sekundären Wärmeabgabe der durch die Absorption der Sonnenstrahlung in der Gläsern einer transparenten

Fläche verursachten Erwärmung der inneren Oberflächen wird hier nicht berücksichtigt, sondern geht erst in die Berechnung der inneren Oberflächentemperaturen der transparenten Bauteile ein. Die Grundlage für diese Berechnung wird allerdings in dem hier geschilderten Berechnungsgang durch die Berechnung der resultierenden Absorptionszahlen geschaffen.

Als Ergebnis dieses Berechnungsschritts liegt für jede transparente Fläche der Gebäudehülle die durch das Glas in das Innere des Raums eindringende flächenbezogene Wärmeleistung sowohl für die Direkt- als auch für die Diffusstrahlung vor. Durch Multiplikation dieser Werte mit der Fläche des jeweiligen transparenten Bauteils und Summierung über alle transparenten Flächen wird schließlich der Tagesgang der durch die solare Einstrahlung im Rauminneren entstehenden Wärmeleistungen, getrennt für die Direkt- und die Diffusstrahlung erhalten. Wie bereits erwähnt, ist die Darstellung dieser Tagesverläufe mittels Momentanwerten zu den vollen Stunden ausreichend.

**Verteilung der solaren Wärmegewinne im Raum:** Die solaren Wärmegewinne erzeugen zum Großteil Wärmequellen an den Innenseiten der raumbegrenzenden Bauteile. Lediglich durch wenig wärmespeichernde Materialien, wie leichte Vorhänge, kann der solare Wärmegewinn sofort der Raumluft zugeteilt werden. In der EN ISO 13791 wird ein solcher Anteil als „Strahlungszuordnungsfaktor Luft“ benannt und mit  $f_{sa}$  gekennzeichnet. Als Standardwert wird  $f_{sa}=0,1$  angesetzt.

Den verbleibenden Rest  $(1-f_{sa})$  der solaren Wärmegewinne gilt es, plausibel auf die inneren Oberflächen der raumbegrenzenden Bauteile zu verteilen. In dieser Hinsicht genügt es, zwischen Boden, Wänden, Gläsern und Decke zu unterscheiden. Als Standardwerte für die in der EN ISO 13791 eingeführten „solaren Verteilungsfaktoren“  $f_{df}$  haben sich in Hinblick auf die Direktstrahlung 0,5 für den Boden, 0,4 für die Wände, 0,0 für die Gläser und 0,1 für die Decke eingebürgert. Obwohl dies physikalisch nicht richtig und begründbar ist, werden diese Verteilungsfaktoren zwecks Vermeidung unnötiger Komplexität zeitunabhängig angesetzt.

Die in den Raum eintretende Diffusstrahlung wird üblicherweise flächengewichtet auf alle raumbegrenzenden Bauteile mit Ausnahme der transparenten Flächen gleich verteilt. Als Ergebnis dieses Berechnungsschritts liegt einerseits der Tagesverlauf des der Raumluft zuzuordnen Anteils der solaren Wärmegewinne vor. Andererseits sind die Quellstärken, d. h. die flächenbezogenen Wär-

leistungen, der aufgrund der solaren Einstrahlung entstehenden Wärmequellen an den inneren Oberflächen aller raumbegrenzenden Bauteile bekannt.

**Die solaren Wärmegewinne in der Wärmebilanzgleichung:** Für das Eintragen in die Wärmebilanzgleichung sind natürlich die Tagesgänge der solaren Wärmegewinne sowohl in der Raumluft als auch für jede an den inneren Oberflächen der raumbegrenzenden Bauteile situierte Wärmequelle mittels Fourier-Analyse in komplexwertige Fourier-Koeffizienten zu transponieren.

In der Wärmebilanzgleichung scheint lediglich der durch  $f_{sa}$  gekennzeichnete Anteil der solaren Wärmegewinne in Form des berechneten Fourierkoeffizienten zur Gänze auf. Bezüglich der durch die solare Einstrahlung auf den Innenseiten der raumbegrenzenden Bauteile auftretenden Wärmequellen ist natürlich der Fourier-Koeffizient mittels Multiplikation mit dem in Gleichung 2.46 definierten Verteilungsschlüssel  $\tilde{v}_{z,z}$  zu reduzieren. Da  $\tilde{v}_{z,z}$  vom Bauteilaufbau abhängig ist, ist diese Berechnung für jeden Bauteil mit unterschiedlichem Schichtaufbau getrennt durchzuführen.

Durch Summation des Fourier-Koeffizienten des der Raumluft direkt zukommenden solaren Wärmegewinns mit den durch die Verteilungsschlüsseln reduzierten Fourierkoeffizienten aller auf den inneren Raumbegrenzungen situierten, durch den solaren Eintrag entstandenen Wärmequellen wird schließlich der in der Bilanzgleichung 2.38 aufscheinende Fourier-Koeffizient  $\hat{\Phi}_G^S$  gebildet.

**Nutzungsbedingte Wärmegewinne** treten einerseits aufgrund der Personenbelegung auf. Andererseits verursacht die Abwärme von Geräten als auch der Beleuchtung einen zusätzlichen Wärmegewinn im Raum. Für die Untersuchung des sommerlichen Raumverhaltens ist sowohl der Tagesgang der Personenbelegung als auch jener der Wärmeabgabe durch Beleuchtung und Geräte in der ÖNorm B 8110-3 festgeschrieben. Eine Änderung dieser Vorgaben ist nur dann zulässig, wenn genauere Informationen zur Raumnutzung zur Verfügung stehen.

In einem ersten Schritt sind somit der Tagesverlauf der Wärmegewinne aufgrund der Personenbelegung und der durch Beleuchtung und Geräte induzierte Tagesverlauf der Wärmegewinne im Raum zu summieren.

Ergebnis dieses Berechnungsschritts ist somit ein Tagesverlauf der nutzungsbedingten Wärmegewinne. Ähnlich wie bei den solaren Wärmegewinnen ist die Festlegung der Tagesgangs in Form von

Momentanwerten zur vollen Stunde ausreichend.

**Verteilung der nutzungsbedingten Wärmegewinne im Raum:**

Auch die nutzungsbedingten Innenwärmern können nicht zur Gänze der Raumluft zugeteilt werden. Im Normalfall wird angenommen, dass 50 % der nutzungsbedingten Wärmegewinne konvektiv, die anderen 50 % aber mittels Wärmestrahlung abgegeben werden.

Es ist nahe liegend anzunehmen, dass die mittels Wärmestrahlung abgegebenen Heizleistungen auf die inneren Oberflächen aller raumbegrenzenden Bauteile flächengewichtet gleichmäßig verteilt werden.

**Die nutzungsbedingten Wärmegewinne in der Wärmebilanzgleichung:**

Der Tagesverlauf der konvektiv an die Raumluft abgegebenen Wärmeleistung wird einer Fourier-Analyse unterworfen. Die solcherart ermittelten Fourier-Koeffizienten gehen zur Gänze in die Wärmebilanzgleichung 2.38 ein. Die Tagesverläufe der mittels Wärmestrahlung auf die inneren Oberflächen der raumbegrenzenden Bauteile übertragenen Heizleistungen sind für jeden unterschiedlichen Bauteilaufbau gesondert zu ermitteln. Nach der Fourier-Analyse sind die Fourier-Koeffizienten natürlich mit dem Element des Heizleistungsverteilungsschlüssels  $\tilde{v}_{z,z}$  zu multiplizieren und erst dann zur Weiterverarbeitung in die Wärmebilanzgleichung 2.38 aufzunehmen.

Da der Heizleistungsverteilungsschlüssel nur vom Aufbau des Bauteils abhängt, aber von der Quellstärke der Wärmequelle unabhängig ist, ist es nahe liegend und effektiv, die Fourierkoeffizienten der aufgrund der solaren Einstrahlung entstandenen Quellstärken und jene, die sich aufgrund der Raumnutzung ergeben, zuerst aufzaddieren und erst dann mit dem Element des Heizleistungsverteilungsschlüssels  $\tilde{v}_{z,z}$  zu multiplizieren.

**Wärmegewinne durch Heizkörper** bzw. der Fourier-Koeffizient  $\hat{\Phi}_G^H$  ist bei der Untersuchung des sommerlichen Raumverhaltens ohne Kühlung oder bei der Simulation des Raumverhaltens im Winter oder in den Übergangszeiten ohne Heizung in der Bilanzgleichung 2.38 gleich Null.

Bei Vorgabe eines Tagesverlaufs der Heiz- oder Kühlleistung kann dieser einer Fourier-Analyse unterworfen werden. Die erhaltenen Fourierkoeffizienten fließen dann direkt in die Wärmebilanzgleichung 2.38 ein. Zu berücksichtigen ist dabei, dass es sich bei den

solcherart eingeführten Heiz- oder Kühlleistungen um rein konvektiv der Raumluft zugeführte Leistungen handelt.

Natürlich kann die Bilanzgleichung 2.38 aber auch nach  $\hat{\Phi}_G^H$  aufgelöst werden, wenn ein gewünschter Tagesverlauf der Raumlufttemperatur vorgegeben wird. In diesem Fall wird die zur Einhaltung der vorgegebenen Lufttemperatur erforderliche Heiz- bzw. Kühlleistung erhalten. Aus den für jede Harmonische aufgestellten Wärmebilanzgleichungen werden in diesem Fall in einem ersten Schritt die Fourier-Koeffizienten  $\hat{\Phi}_G^H$  errechnet. In einem zweiten Schritt wird der gesuchte Tagesgang mittels Fourier-Synthese ermittelt. Natürlich gilt auch für diese Fragestellung, dass die ermittelten Tagesverläufe der erforderlichen Heiz- oder Kühlleistungen rein konvektiv zu erbringen sind. Die Berechnung der Heiz- oder Kühlleistungsgänge entspricht somit dynamischen Heiz- oder Kühllastberechnungen.

## 2.8 Thermische Behaglichkeit

Die thermische Behaglichkeit kann man umschreiben als das Wohlbefinden eines Menschen in einem gegebenen Raumklima. Thermische Behaglichkeit hängt mit dem menschlichen Wärmeempfinden und damit im Wesentlichen vom thermischen Gleichgewicht (Wärmebilanz) des Körpers als Ganzem ab. Dieses Gleichgewicht wird durch körperliche Tätigkeit und Bekleidung sowie durch die Parameter des Umgebungsklimas, das sind Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte beeinflusst [86]. Die thermische Behaglichkeit in Räumen wurde in den 1970er Jahren von Povl Ole Fanger umfangreich untersucht. Dadurch konnte er einen Zusammenhang zwischen dem physiologischen Geschehen im Körper und den physikalischen Wechselwirkungen des Körpers mit der Umwelt herstellen und durch eine Formel beschreiben [22]. Die Ergebnisse seiner Untersuchungen lieferten die Grundlage für die ÖNorm EN ISO 7730 [86] (Abschnitt 2.8.1.1).

Das österreichische Institut für Baubiologie und Bauökologie (IBO) hat eine Reihe von wissenschaftlichen Untersuchungen zum Thema Behaglichkeit durchgeführt. In der Conclusio wird unter anderem erwähnt, dass die Behaglichkeitsbeurteilungen beim jetzigen Architekturzeitgeist für die „Kühlperiode“ bzw. den Sommerfall viel wichtiger als für die Heizungsperiode sind und dynamische Gebäudesimulation am IBO derzeit fast ausschließlich zur Berechnung von Kühllasten und zur Behaglichkeitsbeurteilung für den Sommerfall eingesetzt werden. Überdies wird erwähnt, dass z. B. Gebäude im Passivhausstandard automatisch beste

Raumklimabeurteilung für den Beheizungsfall erfüllen, der Sommerfall jedoch immer wichtiger wird und damit mit besonderer Sorgfalt betrachtet werden muss, denn ein wirklich nachhaltiges Gebäude erfüllt den besten Behaglichkeitsstandard das ganze Jahr hindurch.

Einführend in diese Thematik soll vorerst der Wärmehaushalt des menschlichen Körpers nach [21] besprochen werden: Für eine optimale Funktion der Stoffwechselprozesse in den menschlichen Organen ist eine nahezu konstante Temperatur erforderlich. Unabhängig von den klimatischen Randbedingungen und dem Aktivitätsgrad muss der Mensch die Körpertemperatur innerhalb eines geringen Schwankungsbereichs konstant halten – sie stellt sich im Körperkern zwischen  $36,4\text{ °C}$  und  $37,4\text{ °C}$  ein. Es bedarf des bereits erwähnten thermischen Gleichgewichtes, welches sich aus der Wärmeproduktion des Körpers, der Wärmeaufnahme aus der Umgebung und der Wärmeabgabe an die Umgebung ergibt. Mit zunehmendem Aktivitätsgrad erhöht sich die Wärmeproduktion durch Muskelkontraktion. Die Wärme wird über den Blutkreislauf im Körper verteilt. Die Wärmeabgabe an die Umgebung ist abhängig von der Lufttemperatur, der Strahlungstemperatur der Umgebungsflächen, der relativen Luftfeuchtigkeit, der Windgeschwindigkeit und dem Wärmedurchlasswiderstand der Kleidung. Es werden zwei Arten zur Einhaltung von konstanten Körperkerntemperaturen unterschieden: die verhaltensgesteuerte und die physiologische Thermoregulation. Anpassung durch Bekleidung, thermische Konditionierung von Räumen durch Beheizung oder Kühlung, Aufsuchen verschatteter Orte im Sommer, etc. zählen zu verhaltensgesteuerter Thermoregulation, physiologische Thermoregulation hingegen sind sämtliche unbewusste, „körperlich automatisierte“ Reaktionen (vgl. [59]). Im Winter ist das physiologische Thermoregulationssystem durch verhaltensgesteuerte Maßnahmen wie warme Kleidung und Beheizung von Räumen zu einem Großteil entlastet. Im Sommer hingegen ist die physiologische Thermoregulation zum Teil mehr gefordert, da Aufenthaltsräume – vor allem bei Wohnnutzung – in Zentraleuropa nur in geringer Zahl durch Anlagentechnik gekühlt werden und Kleidung durch den Berufsalltag nicht beliebig angepasst werden kann. Überschreitet die Körperkerntemperatur den Sollwert, so wird die Durchblutung der Extremitäten und der Haut erhöht, wodurch die Temperaturdifferenz zwischen Haut und Umgebung steigt und mehr Wärme über Strahlung und Konvektion abgegeben werden kann. Die äußersten Extremitäten des Körpers können besonders variabel durchblutet werden. Durch die stärkere Durchblutung herzferner Körperregionen und dabei feiner Blutgefäße wird der Strömungswiderstand erhöht und es kommt zu stärkerer Belastung des Herz-Kreislaufsystems. Die maximale Oberflächentemperatur der Haut

beträgt 36 °C [37]. Überschreitet die Luft- und Strahlungstemperatur der Umgebung diesen Wert, dann ist die Schweißverdunstung die einzige Ermöglichung einer Wärmeabgabe. Je höher die Luftfeuchtigkeit der Umgebung und je höher der Salzgehalt des Schweißes, desto geringer ist aufgrund kleinerem Wasserdampfpartialdruckunterschied die mögliche Wärmeabgabe über die Transpiration. Für die Schweißbildung wird dem Blutplasma Flüssigkeit entzogen und erhöht damit die Viskosität des Blutes. Wird dem Körper nicht genügend Flüssigkeit nachgeführt, so kommt es auch bei dieser physiologischen Thermoregulationsart zu erhöhter Belastung des Herz-Kreislaufsystems [37].

### 2.8.1 Normative Lage

Die Ermittlung der Behaglichkeit kann durch Messung laut ÖNorm EN ISO 7726 [84] erfolgen oder im Falle von (Vor-)Berechnungen nach ÖNorm EN ISO 7730 [86]. Die ÖNorm EN 15251 gibt neben anderen Thematiken zur Behaglichkeit wie Raumluftqualität, Licht und Akustik auch Informationen zur thermischen Behaglichkeit – u. a. gibt sie Bereiche der zulässigen Innentemperaturen im Sommer vor.

#### 2.8.1.1 ÖNorm EN ISO 7730

Die Bewertung der thermischen Behaglichkeit wird in der internationalen Norm EN ISO 7730 [86] in die globale Behaglichkeit, auf die folgend detaillierter eingegangen wird und die lokale thermische Behaglichkeit unterteilt. Die globale Bewertung ergibt sich aus der Wärmebilanzgleichung für den menschlichen Körper, die auf die entwickelte Formel von P. O. Fanger in [22] zurückgeht. Sie stellt die Basis für eine analytische Berechnung und Bewertung der thermischen Behaglichkeit anhand der PMV- (Predicted Mean Vote) und PPD- (Predicted Percentage of Dissatisfied) Indizes. Dabei stehen die Faktoren der menschlichen Wärmeproduktion (die Stoffwechselrate, korrigiert für mechanische Arbeit  $M$  sowie die externe mechanische Arbeit  $W$ ) den Faktoren der Wärmeabfuhr gegenüber (vgl. [109], [73]). Diese sind:

- thermischer Widerstand der Bekleidung [clo] ( $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$ )
- mittlere Lufttemperatur  $t_a$  [°C]
- mittlere Strahlungstemperatur  $t_r$  [°C]
- relative Luftgeschwindigkeit  $v_{ar}$  [m/s]
- Luftfeuchte, genauer der Wasserdampfpartialdruck  $p_a$  [Pa]
- konvektiver Wärmeübertragungskoeffizient  $t_{cl}$  [ $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ]



**Tabelle 2.5:** Psychophysische Beurteilungsskalen für Predicted Mean Vote (PMV) und Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) [86].

Bezeichnung	PMV-Index	PPD-Index
heiß (hot)	+3	99,1
warm (warm)	+2	76,8
etwas warm (slightly warm)	+1	26,1
neutral (neutral)	0	5,0
etwas kühl (slightly cool)	-1	26,1
kühl (cool)	-2	76,8
kalt (cold)	-3	99,1

Die Wärmebilanzgleichung mit zuvor aufgelisteten Faktoren liefert als Ergebnis eine flächenbezogene Leistung ( $\text{W}/\text{m}^2$ ). Diese wurde von Fanger auf das PMV (dt.: vorausgesagtes mittlere Votum) mit einer Skala von -3 (kalt) über Null bis +3 (heiß) abgebildet [22] (siehe Tab. 2.5). Wenn die Differenz von Wärmeproduktion und -abfuhr in der Bilanzgleichung Null und somit auch das PMV Null ergibt, muss der Körper keine körperlichen Regulationsanstrengungen unternehmen um einen Ausgleich zu erreichen. Werte zwischen -0,5 und +0,5 gelten üblicherweise als komfortabel. Entfernt sich das PMV weiter von Null, muss der Organismus für den Ausgleich sorgen, was in der Folge als Diskomfort empfunden wird. Als Randbedingungen und folglich zu gültigen PMV-Werten führend können für die 6 Hauptparameter folgende Intervalle angegeben werden:  $M = 46$  bis  $232 \text{ W}/\text{m}^2$  (0,8 bis 4 met);  $I_{cl} = 0$  bis  $0,31 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$  (0 bis 2 clo);  $t_a = 10$  bis  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_r = 10$  bis  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $v_{ar} = 0$  bis  $1 \text{ m}/\text{s}$ ;  $p_a = 0$  bis  $2700 \text{ Pa}$ . Die Berechnung des PMV-Index erfolgt nach Formel 2.50 [86].

$$\begin{aligned}
 PMV = & (0,303 \cdot e^{-0,036 \cdot M} + 0,028) \cdot \{(M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \\
 & \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} M \\
 & \cdot (5867 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \\
 & \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)\} \quad (2.50)
 \end{aligned}$$

$M$	Energieumsatz [ $\text{Wm}^{-2}$ ]
$W$	wirksame mechanische Leistung [ $\text{Wm}^{-2}$ ]
$f_{cl}$	Bekleidungsflächenfaktor
$t_a$	Lufttemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\bar{t}_r$	mittlere Strahlungstemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$v_{ar}$	relative Luftgeschwindigkeit [m/s]
$p_a$	Wasserdampfpartialdruck [Pa]
$h_c$	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient [ $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ]
$t_{cl}$	Oberflächentemperatur Bekleidung [ $^{\circ}$ ]

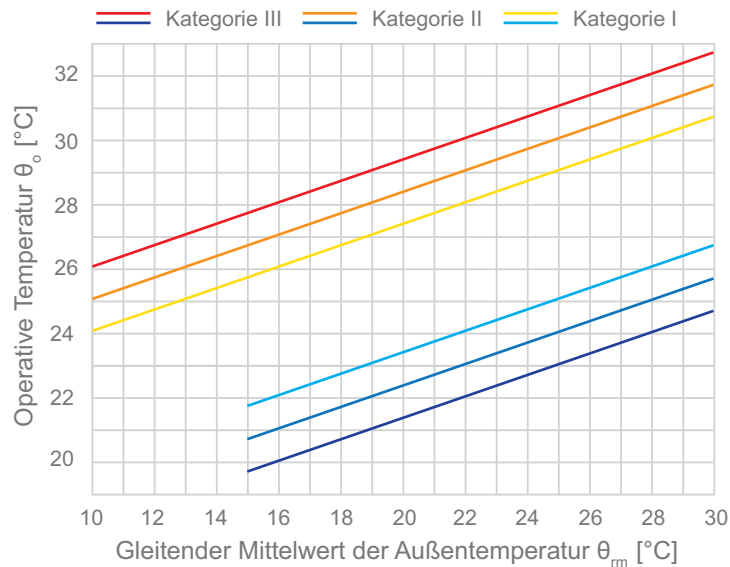
Aus dem PMV lässt sich der PPD (dt.: vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen) berechnen. Der PPD gibt den prozentualen Anteil von Personen an, die mit einem bestimmten Umgebungsklima unzufrieden sind. Unzufriedene Personen sind dabei solche, die nach der 7-stufigen Klimabeurteilungsskala entweder mit heiß, warm, kühl oder kalt urteilen. Auf die lokale thermische Behaglichkeit soll an dieser Stelle nicht genauer eingegangen werden, weitere Informationen können der Norm [86] entnommen werden.

### 2.8.1.2 ÖNorm EN 15251

Mit der Einführung der ÖNorm EN 15251 [88] „Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik“ wurde das Thema thermohygrischer, akustischer, visueller und olfaktorischer Komfort der Nutzer von Gebäuden neben der rein energetischen Betrachtung in den Fokus der Planer gerückt [47]. In dieser Norm wird bezüglich dem thermischen Raumklima im Sommerfall zwischen maschinell gekühlten und Gebäuden ohne maschineller Kühlung unterschieden. Im informativen Anhang werden Kriterien für das thermische Raumklima empfohlen, wobei die zulässigen Bereiche der operativen Raumtemperatur in Abhängigkeit eines gleitenden Mittelwertes der Außentemperatur angegeben werden, ersichtlich in Abbildung 2.18. Der angegebene Temperaturbereich ist nach Norm für Büro- und Wohngebäude gültig, für Personen, die hauptsächlich sitzende Tätigkeiten ausführen, die Kleidung an die thermischen Bedingungen anpassen können. Zudem müssen Fenster geöffnet werden können.

## 2.8.2 Bewertung anhand operativer Temperatur

Normgemäß wird zum Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes nach dem detaillierten Verfahren der ÖNorm B 8110-3 (Kapitel 3.1.1) der Verlauf der operativen Raumtemperaturen gefordert. Aus zuvor gewonnenen Erkenntnissen der ÖNorm EN ISO 7730 wirken sich aber



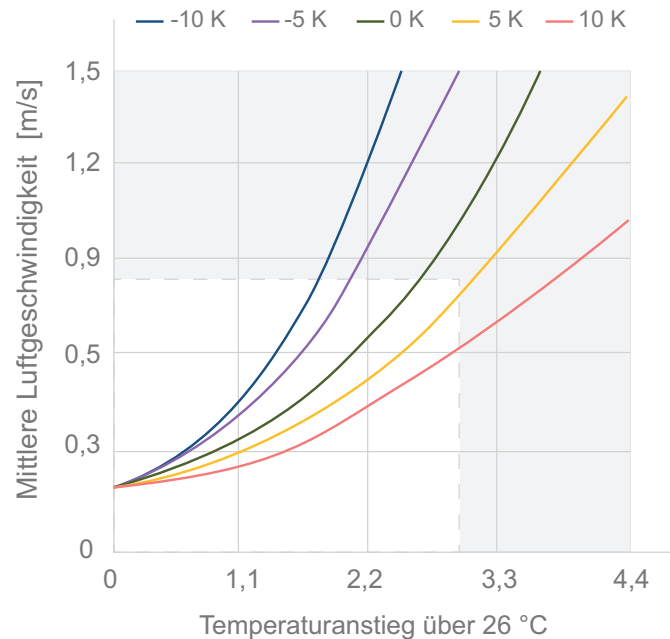
**Abbildung 2.18:** Auslegungswerte für operative Innentemperatur von Gebäuden ohne maschinelle Kühlanlage, dargestellt als Funktion des exponentiell gewichteten gleitenden Mittelwertes der Außentemperatur (vgl. [88]).

neben der Luft- und mittleren Strahlungstemperatur auch die relative Luftfeuchtigkeit und die Luftgeschwindigkeit auf das thermische Behagen der Menschen aus<sup>25</sup>. Es stellt sich die Frage, wie sich speziell bei der Betrachtung für typische Räume im Sommer die Parameter Luftgeschwindigkeit und relative Luftfeuchtigkeit auswirken und wie relevant sie im Verhältnis zu den Temperaturen sind.

Die Norm [86] selbst vermerkt, dass bei gemäßigten Temperaturen ( $< 26\text{ °C}$ ) und bei mäßiger körperlicher Tätigkeit ( $< 2\text{ met}$ ) der Einfluss der Luftfeuchte sehr begrenzt ist, in einem gemäßigten Umgebungsklima die Luftfeuchte also geringe Auswirkung auf das Wärmeempfinden hat. Dabei wird bei einer um 10 % höheren relativen Luftfeuchtigkeit die Umgebung genauso warm empfunden wie eine um  $0,3\text{ °C}$  höhere operative Temperatur.

Die Luftgeschwindigkeit beeinflusst den konvektiven Wärmeaustausch zwischen einer Person und der Umgebung. Eine erhöhte Luftgeschwindigkeit kann genutzt werden, um das Wärmeempfinden durch Temperaturen über dem Behaglichkeitsbereich auszugleichen [86]. Abbildung 2.19 zeigt die erforderliche Luftgeschwindigkeit, um eine erhöhte Temperatur auszugleichen.

<sup>25</sup>Für die sich auch auf das thermische Behagen auswirkende Bekleidung und den aktuellen körperlichen Aktivitätsgrad werden für folgenden Untersuchung Standardwerte angenommen.



**Abbildung 2.19:** Erforderliche Luftgeschwindigkeit, um eine Temperatur über 26 °C auszugleichen. Für leichte, überwiegend sitzende Tätigkeit sollte  $\Delta t \leq 3^\circ\text{C}$  und  $\bar{v} < 0,82\text{ m/s}$  sein. Die Farben geben Auskunft über die Differenz zwischen Strahlungstemperatur und Lufttemperatur ( $\bar{t}_r - t_a$ ) bei -10K, -5K, 0K, 5K und 10K.

Um die Einflussfaktoren auf das thermische Behagen quantitativ herauszuarbeiten, wurden in [73] die einzelnen Parameter nacheinander ausgehend von als „ideal“ aufgestellten Raumbedingungen (PPD=5 %) verändert, während die restlichen Faktoren unverändert blieben. Es wurden so Regressionsgeraden der Parameter hinsichtlich des PMV und PPD für verschiedene Raumkonditionen (sehr kalt bis sehr warm) ermittelt. Die Autoren merken jedoch an, dass sich dabei eine Problematik in der Definition eines geeigneten Wertebereichs, in welchem sich die Einflussparameter bewegen dürfen, ergibt. Werden die teilweise extrem angenommenen Klimarandbedingungen zur Bestimmung der Steigungen der Regressionsgeraden herangezogen, ergeben sich die in Abbildung 2.20 dargestellten Abhängigkeiten, die wiederum Aussage auf den Einfluss der einzelnen Parameter geben. Aus der Grafik lässt sich allgemein schließen, dass in kühleren Räumen die Luftgeschwindigkeit dominierenden Einfluss auf das PMV hat, bei eher wärmeren Räumen dagegen die Luft- und Strahlungstemperatur die wesentlich beeinflussenden Faktoren sind (vgl. [73]).

Um die in [73] angesprochene Problematik des Wertebereichs für

die Fragestellung hinsichtlich der Thematik dieser Arbeit etwas einschränken zu können, werden die Randbedingungen folgend auf in unseren Breiten typisch vorkommende sommerliche Raumklimata eingeschränkt und dafür das PMV und PPD ermittelt (siehe Tabelle 2.6). Dabei werden immer gleichbleibende Standardwerte für eine im Sommer passende (Büro-)Bekleidung ( $0,7 \text{ clo}^{26}$ ), eine metabolische Rate von  $1 \text{ met}^{27}$ , vorerst eine Luftgeschwindigkeit von  $0,1 \text{ m/s}$  und eine relative Luftfeuchte, die sich auf die im Juli in Wien vorkommende mittlere relative Luftfeuchte bezieht ( $65\%$  bei  $20,8^\circ\text{C}$ )<sup>28</sup> angenommen. In einem ersten Schritt werden dann die Luft- und Strahlungstemperaturen – vereinfacht gleich angenommen – variiert bei  $21^\circ\text{C}$ , bei  $24^\circ\text{C}$ , bei  $27^\circ\text{C}$  und bei  $30^\circ\text{C}$ , sowie die relativen Luftfeuchten entsprechend der Lufttemperatur umgerechnet. In einem nächsten Schritt wird die Luftgeschwindigkeit variiert, wobei Werte zwischen  $0,1$  und  $0,4 \text{ m/s}$  angenommen werden<sup>29</sup>. Des Weiteren wird die Luftfeuchte im Wertebereich zwischen  $40$  und  $70\%$  variiert. Tabelle 2.6 zeigt die ermittelten PMV- und PPD-Indizes für beschriebene Randbedingungen und Abbildung 2.21 die Differenzen der Minima und Maxima der ermittelten PMV-Werte und gibt damit Auskunft über den Einfluss der Parameter bei diesem eingeschränkten Wertebereich. Auch dabei ist wieder eine Erhöhung des Einflusses der relativen Luftfeuchte bei höheren Raumtemperaturen erkenntlich. Gegenteilig wirkt sich der Einfluss der Luftgeschwindigkeit aus – dieser wird bei höheren Raumtemperaturen kleiner. Verglichen mit dem Einfluss der Luft- und Strahlungstemperatur sind jedoch – wie in Abbildung 2.21 ersichtlich – sowohl der Einfluss der relativen Luftfeuchte als auch der Luftgeschwindigkeit relativ gering. Wird also in unseren Breiten nicht durch künstliche Konditionierung relative Luftfeuchte oder Luftgeschwindigkeit außergewöhnlich verändert, so kann

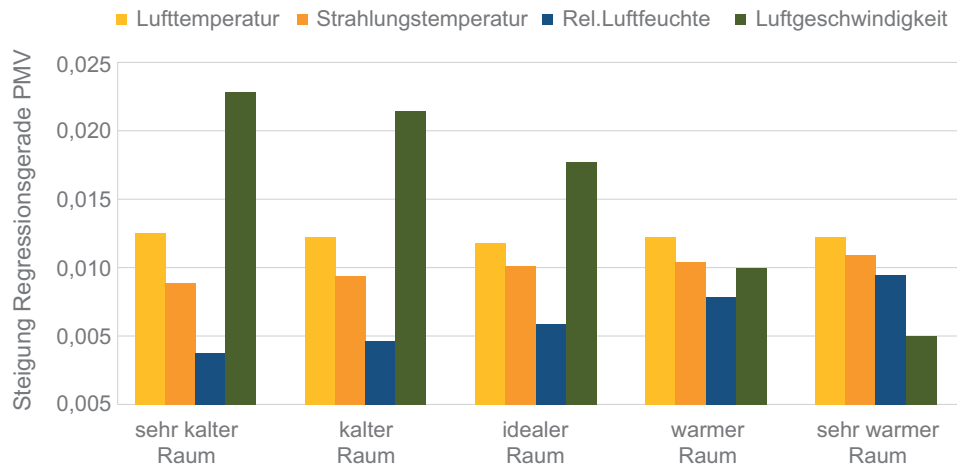
---

<sup>26</sup> $0,7 \text{ clo}$  entspricht einem thermischen Isolationswert einer täglichen Bekleidung z. B. aus Unterwäsche, Hemd, Hose, Socken und Schuhen [86].

<sup>27</sup> $1 \text{ met}$  entspricht einem Energieumsatz von  $58 \text{ W/m}^2$  und damit einer sitzenden, entspannten Aktivität [86].

<sup>28</sup>Quelle: ZAMG - Klimaabteilung (Messwerte von Wien 19., Hohe Warte), der Normalwert wird aus dem langjährigen Monatsmittel der Jahre 1971 bis 2000, ab Januar 2015 aus dem langjährigen Monatsmittel der Jahre 1981-2010 errechnet.

<sup>29</sup>Anhand des Berechnungsblattes „SommLuft“ des Passivhaus Projektierungspaketes (PHPP) wurden verschiedene natürliche Luftwechsel für einen angenommenen Raum von  $6 \times 4 \times 2,5 \text{ m}$  berechnet. Dabei wurden bei einem 24h geöffneten Fenster ( $1 \times 1,3 \text{ m}$ ) und einer Temperaturdifferenz von  $0 \text{ K}$  und einer erhöhten Windgeschwindigkeit von  $2 \text{ ms}^{-1}$  ein Luftwechsel von  $3,12 \text{ h}^{-1}$  und damit eine Luftgeschwindigkeit beim Fensterquerschnitt von  $0,04 \text{ ms}^{-1}$  ermittelt. Bei keinem Wind und  $4 \text{ K}$  Temperaturdifferenz ergibt sich eine Luftgeschwindigkeit von  $0,8 \text{ ms}^{-1}$ . Bei Hinzufügen eines weiteren Fensters gleicher Dimension und damit sich ergebender Querlüftung ergibt sich bei einer erhöhten Windgeschwindigkeit von  $2 \text{ ms}^{-1}$  ein Luftwechsel von  $36,9 \text{ h}^{-1}$  und eine Luftgeschwindigkeit von  $0,47 \text{ ms}^{-1}$ . Die angenommenen Werte für die Luftgeschwindigkeit zwischen  $0,1$  und  $0,4 \text{ ms}^{-1}$  sind also durchaus plausibel.

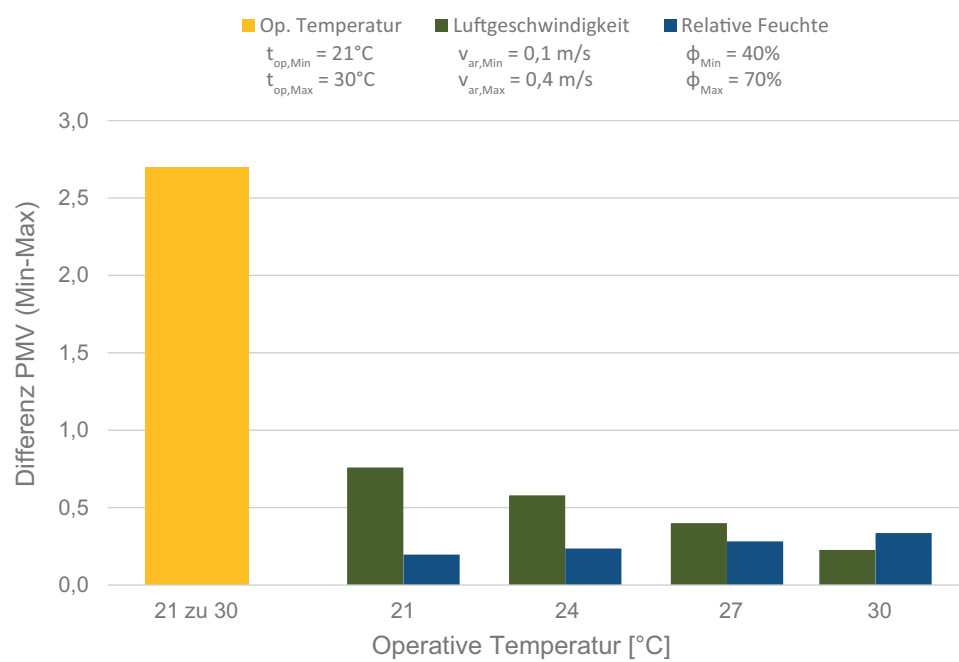


**Abbildung 2.20:** Steigungen der Regressionsgeraden für unterschiedliche thermische Raumkonditionierungen. Aus der Größe der Steigung lässt sich der Einfluss des jeweiligen Parameters auf das PMV und damit auch das PPD ableiten (vgl. [73]).

man den Temperatureinfluss als entscheidende Einflussgröße erachten und das Raumklima näherungsweise durch die beiden Parameter Lufttemperatur und Strahlungstemperatur des Raumes und damit anhand der sogenannten „operativen Temperatur“ (siehe Abschnitt 2.1.1.3) beschreiben. Dabei lässt sich verallgemeinern, dass je weniger Luft- und Strahlungstemperatur voneinander abweichen (max. 3 K) und je mehr sich beide Temperaturen dem Wert von 21-22 °C nähern, desto behaglicher fühlt sich der Mensch [42].

**Tabelle 2.6:** PMV- und PPD-Indizes für verschiedene sommerliche Raumklimata.

Luft Temperatur	Mittel Strahlungstemperatur	Luftgeschwindigkeit	Relative Feuchte	Clothing	Metabolische Rate	PMV	PPD	Differenz: Abs(Min-Max)
21	21	0,1	64,2	0,7	1	-1,17	33,87	2,70
24	24	0,1	53,5	0,7	1	-0,28	6,65	
27	27	0,1	44,8	0,7	1	0,62	13,11	
30	30	0,1	37,6	0,7	1	1,53	52,62	
21	21	0,1	64,2	0,7	1	-1,17	33,87	0,76
21	21	0,2	64,2	0,7	1	-1,52	52,24	
21	21	0,3	64,2	0,7	1	-1,75	64,79	
21	21	0,4	64,2	0,7	1	-1,93	73,56	
24	24	0,1	53,5	0,7	1	-0,28	6,65	0,58
24	24	0,2	53,5	0,7	1	-0,55	11,38	
24	24	0,3	53,5	0,7	1	-0,73	16,21	
24	24	0,4	53,5	0,7	1	-0,86	20,73	
27	27	0,1	44,8	0,7	1	0,62	13,11	0,40
27	27	0,2	44,8	0,7	1	0,43	8,91	
27	27	0,3	44,8	0,7	1	0,31	7,03	
27	27	0,4	44,8	0,7	1	0,22	6,01	
30	30	0,1	37,6	0,7	1	1,53	52,62	0,23
30	30	0,2	37,6	0,7	1	1,42	46,97	
30	30	0,3	37,6	0,7	1	1,35	43,31	
30	30	0,4	37,6	0,7	1	1,30	40,50	
21	21	0,1	40	0,7	1	-1,33	41,84	0,20
21	21	0,1	50	0,7	1	-1,26	38,47	
21	21	0,1	60	0,7	1	-1,20	35,20	
21	21	0,1	70	0,7	1	-1,13	32,06	
24	24	0,1	40	0,7	1	-0,39	8,15	0,24
24	24	0,1	50	0,7	1	-0,31	6,99	
24	24	0,1	60	0,7	1	-0,23	6,10	
24	24	0,1	70	0,7	1	-0,15	5,48	
27	27	0,1	40	0,7	1	0,57	11,96	0,28
27	27	0,1	50	0,7	1	0,67	14,45	
27	27	0,1	60	0,7	1	0,76	17,33	
27	27	0,1	70	0,7	1	0,86	20,58	
30	30	0,1	40	0,7	1	1,55	54,09	0,34
30	30	0,1	50	0,7	1	1,67	60,17	
30	30	0,1	60	0,7	1	1,78	66,11	
30	30	0,1	70	0,7	1	1,89	71,79	



**Abbildung 2.21:** Differenzen der Minima und Maxima der ermittelten PMV-Werte bei auf unsere Breiten typische sommerliche Räume angepasste Wertebereiche der Einflussparameter. Die Größe der Differenz gibt Auskunft über die Gewichtung der Parameter.





## Kapitel 3

# Methoden zur Bewertung der Sommertauglichkeit

Nach Definition der normativen Lage in Österreich, als auch im gesamten deutschsprachigem Raum, werden darauffolgend vereinfachte Bewertungsverfahren detaillierteren Simulationsverfahren gegenübergestellt, sowie Vor- und Nachteile einzelner Verfahren analysiert.

### 3.1 Normative Lage

Die österreichische Norm B 8110-3 stellt ein vereinfachtes Verfahren zum Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes zur Verfügung. Vergleichsweise soll auch die normative, etwas andere Herangehensweise in Deutschland und der Schweiz beleuchtet und folgend zusammengefasst werden.

#### 3.1.1 Österreich: ÖNorm B 8110-3, OIB Richtlinie 6

In Österreich dienen sechs OIB-Richtlinien der Harmonisierung der bautechnischen Vorschriften. In landesrechtlichen Bestimmungen wurden die OIB-Richtlinien in den einzelnen Bundesländern<sup>1</sup> für verbindlich erklärt. Die OIB-Richtlinie 6 [83] widmet sich dem Thema Energieeinsparung und Wärmeschutz und beinhaltet auch einen Abschnitt zur sommerlichen Überwärmung. In der Fassung 2011 wurde bei Neubau und größerer Renovierung von Wohngebäuden gefordert, die ÖNorm B 8110-3 [92] mit gegebenen Einschränkungen zur Verwendung des vereinfachten Verfahrens einzuhalten. In der aktuellen Fassung 2015 werden diese Einschränkungen übergangen (siehe Abschnitt 3.2.2). Der Großteil der Thematik zur Vermeidung sommerlicher Überwärmung

---

<sup>1</sup>Salzburg ist einzige Ausnahme, da derzeit nur die OIB-Richtlinie 6 verbindlich ist.

findet sich also in der ÖNorm B 8110-3 [92]. Die Norm stellt zwei unterschiedliche Verfahren zur Verfügung, welche zumindest bei der Bewertung der Sommertauglichkeit von Wohnräumen gleichberechtigt angewendet werden können. Für andere Nutzungen entfällt eine der Möglichkeiten, das vereinfachte Verfahren. Es muss die zweite Möglichkeit – ein Simulationsverfahren zur Berechnung des Tagesverlaufes der operativen Raumtemperatur – angewendet werden. Die ÖNorm B 8110-3 definiert, dass dieses Simulationsverfahren die Anforderungen der ÖNorm EN ISO 13791 erfüllen muss. Diese Definition lässt Interpretationsspielraum offen, da nicht explizit erwähnt wird, dass die Simulationsmethode nach dem in der EN ISO 13791 enthaltenen Validierungsverfahren validiert werden muss. Bei dem Simulationsverfahren zur Ermittlung der operativen Temperaturen gilt die sommerliche Überwärmung als vermieden, wenn die operative Temperatur in Haupträumen unter den in der Norm angegebenen Klimarandbedingungen, inneren Lasten, und Lüftungsmöglichkeiten die Grenze von 27,0 °C im Tagesverlauf, sowie in Schlaf-/Ruheräumen während des Nachtzeitraums von 25,0 °C, nicht überschreitet. Die aktuelle Version der ÖNorm B 8110-3:2012 bezieht sich dabei auf die ISO 13791:2004, von der bereits zwei Nachfolgedokumente existieren (ISO 13791:2010, ISO 13791:2012). Das vereinfachte Verfahren der ÖNorm B 8110-3 wird in Abschnitt 3.2.2 detailliert behandelt, das Simulationsverfahren nach ÖNorm EN ISO 13791 in Abschnitt 3.1.4.

### 3.1.2 Deutschland: DIN 4108-2

In Deutschland ist der sommerliche Wärmeschutz in der DIN 4108-2 [11] geregelt. Ähnlich wie in Österreich gibt es zwei grundsätzlich gleichberechtigte Verfahren – ein vereinfachtes, sowie ein detailliertes Simulationsverfahren. Die Norm gibt zudem zulässige Werte von Grundflächen bezogenen Fensterflächenanteilen an, unterhalb dessen, bei Wohnnutzung in Kombination mit entsprechender Sonnenschutzeinrichtungen gänzlich auf einen sommerlichen Wärmeschutznachweis verzichtet werden kann (Normabschnitt 8.2.2). Das vereinfachte Verfahren unterscheidet sich jedoch von jenem Österreichs und bedient sich sogenannter Sonneneintragskennwerte. Das Konzept wird in Abschnitt 3.2.3 näher erläutert. Auch in Deutschland muss der Nachweis zur Einhaltung der Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz zumindest für den Raum durchgeführt werden, der im Rahmen des Anwendungsbereichs zu den höchsten Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz führt – also den kritischsten Raum des Gebäudes. Das anzuwendende Simulationsverfahren, das nach DIN EN ISO 13791 validiert sein muss, ist in Abschnitt 3.1.4 näher beleuchtet. Für die Bewertung der

**Tabelle 3.1:** Zugrunde gelegte Bezugswerte der operativen Innentemperatur für die Sommerklimaregion und Übertemperaturgradstunden-Anforderungswerte [11].

Sommerklimaregion	Bezugswert $\theta_{b,op}$ Innentemp. $^{\circ}C$	Anforderungswert Übertemperaturgradstunden $K/ha$	
		Wohngebäude	Nichtwohngebäude
A	25		
B	26	1200	500
C	27		

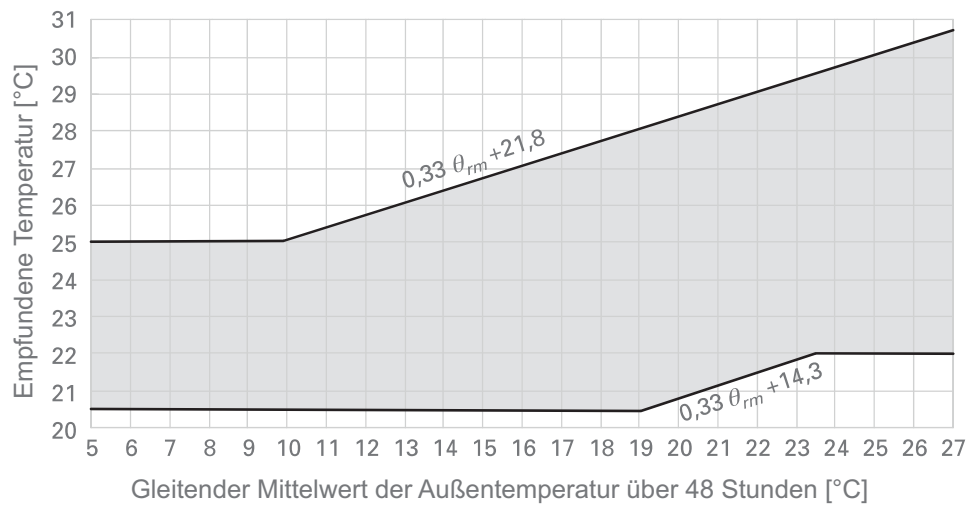
thermischen Behaglichkeit in Innenräumen werden dabei zur Nachweisführung – gegensätzlich zu Österreich, wo ein fixes Maximum festgelegt ist – die in Tabelle 3.1 angegebenen Bezugswerte der operativen Innentemperaturen in Abhängigkeit von drei Sommer-Klimaregionen (A, B und C) vorgegeben. Beim Nachweis dürfen bei entsprechend gewähltem Bezugswert der Innentemperatur die in Tabelle 3.1 angegebenen Übertemperaturgradstunden-Anforderungswerte nicht überschritten werden.

### 3.1.3 Schweiz: SIA 180

In der Schweiz ist der sommerliche Wärmeschutz im Kapitel 5 der Norm SIA 180 [113] geregelt. Die Norm wurde im Jahr 2014 in überarbeiteter Version veröffentlicht. Der Wärmeschutz im Sommer ist für alle Hauptnutzflächen zu gewährleisten – wobei alle Räume, in welchen sich Personen mehr als eine Stunde täglich aufhalten der Hauptnutzung zugeteilt sind (außer Verkehrsflächen). Der Nachweis muss für die kritischen Räume des Gebäudes einzeln durchgeführt werden. Es stehen dabei drei Nachweisverfahren zur Verfügung, wobei die beiden ersten als vereinfachte Verfahren und das dritte als detailliertes Simulationsverfahren einzustufen sind [103] [114]:

**Verfahren 1** Globalbeurteilung von Standardfällen: Keine Berechnung, lediglich Einhalten einfacher Kriterien, wie maximaler Glasanteil der Fassade und Gesamtenergiedurchlassgrad, Sonnenschutz, maximale Raumtiefe, Nachtauskühlung, usw. Ziel ist die Anwendbarkeit für alle Wohngebäude, womit 70 % der Fälle abgedeckt sind. Wird von einer Anforderung abgewichen, muss Verfahren 2 angewendet werden.

**Verfahren 2** Rechnerischer Nachweis: Nachweis einer effizienten Nachtauskühlung, Nachweis genügender Sonnenschutzeinrichtung ( $g_{tot}$ ),



**Abbildung 3.1:** Zulässiger Bereich der empfundenen Temperatur in Räumen mit natürlicher Lüftung, während diese weder beheizt noch gekühlt sind, je nach dem gleitenden Mittelwert der Außentemperatur [113].

Nachweis ausreichender Wärmedämmung und Wärmespeicherfähigkeit. Anwendbarkeit für die meisten Wohngebäude, Verwaltungsgebäude und andere Gebäude ohne Kühlung, demnach in weiteren 20 % der Fälle. Wird von einer Anforderung abgewichen, muss Verfahren 3 verwendet werden.

**Verfahren 3 Simulation:** Nachweis der Behaglichkeitsanforderung wird durch dynamische Simulationsberechnung erbracht. Es ist nicht wie in Österreich ein Einzahlen-Wert für das operative Temperaturmaximum festgelegt, sondern die Behaglichkeitsanforderungen sind gemäß Abbildung 3.1 einzuhalten. Ggf. Berechnung des Energiebedarfs der Kühlung. Anwendbarkeit für alle Gebäude.

Verfahren 1 und 2 werden unter den vereinfachten Verfahren in Abschnitt 3.2.4 vorgestellt, die Beschreibung des Simulationsverfahrens nach EN ISO 13791 findet sich in Abschnitt 3.1.4.

### 3.1.4 Europa: EN ISO 13791, EN ISO 13792

Die europäische Norm EN ISO 13791:2012 [93] legt Annahmen, Randbedingungen, Gleichungen und Validierungsprüfungen für ein Verfahren zur Berechnung des Verlaufs der Innentemperaturen (Luft und operativ) eines Einzelraumes ohne Kühlanlage während der warmen Jahreszeit unter stundenbezogenen Übergangsbedingungen fest. Die in der

Norm angegebenen Verfahren zur Lösung des Gleichungssystems zu den transienten Wärme- und Masseübertragungsvorgängen zwischen der Außen- und der Innenumgebung durch die opaken und transparenten Elemente der Raumschließungsflächen ermöglichen es dem Anwender, die zeitabhängige Temperatur jedes Bauteils, einschließlich der Innentemperatur, zu bestimmen. Es werden dabei keine spezifischen numerischen Verfahrensweisen vorgeschrieben. Das in der Norm enthaltene Validierungsverfahren wird im Zuge dieser Arbeit dazu verwendet, Validierungen einer Auswahl thermisch energetischer Gebäudesimulationsprogramme durchzuführen und zu diskutieren (siehe Abschnitt 5).

Neben den teilweise in ihrer Verwendung eingeschränkten vereinfachten Verfahren der ÖNorm B 8110-3, DIN 4108 und SIA 180 ist in den genannten Normen jeweils die detaillierte Berechnung anhand von Simulationsprogrammen – den Anforderungen der EN ISO 13791 entsprechend – zulässig. Anforderungen und Randbedingungen für die thermische Gebäudesimulation sind dabei in den jeweiligen nationalen Normen genauer spezifiziert. Auch der Strahlungsdurchgang sowie die natürliche Lüftung wurden in der ÖNorm B 8110-3:2012 auf nationaler Ebene festgelegt.

Auch die EN ISO 13792 kann zu einer Validierung herangezogen werden. Nach den Untertiteln der beiden ISO-Normen müssten sie eigentlich aufeinander aufbauen:

**EN ISO 13791** Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren

**EN ISO 13792** Vereinfachtes Berechnungsverfahren

In der Realität sind beide Normen weitgehend redundant. Sie enthalten die selben 18 Prüfbeispiele. Allerdings unterscheiden sich sowohl die Referenzergebnisse als auch die Validierungsbereiche. Es sind weder Gründe für die Unterschiede angegeben, noch ist direkt erkennbar, welche Angaben zur Validierung herangezogen werden müssen (vgl. [111]). Eine Gegenüberstellung wichtiger Unterschiede der beiden Normen ist in Anhang C tabellarisch dargestellt.

### 3.2 Vereinfachte Verfahren

Nach der Erläuterung einer nicht normgemäßen, stationären Überschlagsberechnung zur groben Abschätzung werden vereinfachte normgemäße Verfahren in Österreich, Deutschland und der Schweiz vorgestellt.

### 3.2.1 Stationäre Überschlagsberechnung

Beginnend wird ein einfaches Handrechenverfahren (vgl. [69]) vorgestellt, das jedoch ausschließlich für eine überschlagsmäßige bzw. schnelle Grobabschätzung des Sommerverhaltens angewendet werden sollte. Als Ergebnis dieser Methode, die sich der stationären Wärmebilanzgleichung bedient, wird nur der Tagesmittelwert der Lufttemperatur des untersuchten Raumes und kein gesamter Tagesverlauf erhalten. Minima und vor allem interessierende Maxima der Raumtemperatur sind demnach nicht bekannt. Bei stationärer, also zeitunabhängiger Betrachtung, gleichen sich die Wärmeverluste und die Wärmegewinne aufgrund der Energieerhaltung aus, wie in der stationären Wärmebilanzgleichung 3.1 abgebildet. Dabei sind auf linker Seite die Transmissionswärmeverluste und Lüftungswärmeverluste den Wärmegewinnen auf rechter Seite gegenübergestellt (Wärmegewinne durch solare Einstrahlung, nutzungsbedingte Wärmegewinne und Wärmegewinne durch Heizung). Die Transmissionswärmeverluste ergeben sich aus der Multiplikation des thermischen Transmissionsleitwerts der Gebäudehülle  $L_T$  [WK<sup>-1</sup>] mit der Differenz zwischen Innenlufttemperatur und Außenlufttemperatur ( $\Theta_i - \Theta_e$ ) [K]. Die Lüftungswärmeverluste ergeben sich äquivalent, jedoch ist nun der Proportionalitätsfaktor der Lüftungsleitwert  $L_V$  [WK<sup>-1</sup>]. Vernachlässigt man zur allgemeinen Analyse zunächst noch die gebäude- und nutzungsspezifischen Parameter (Transmissionsleitwert, der sich aus den Bauteilaufbauten ergibt, sowie Lüftungsverhalten und interne Lasten), so wird bei Betrachtung der stationären Wärmebilanzgleichung schnell ersichtlich, dass die Außenlufttemperatur  $\Theta_e$  sowie die solare Einstrahlung  $\Phi_s$  wesentlichen Einfluss auf das thermische Gebäudeverhalten haben. Die sich auf den (operativen) Raumtemperaturverlauf auch stark auswirkende effektive Wärmespeicherfähigkeit der Bauteile hat in dem hier diskutierten stationären Fall keinen Einfluss – sie kommt natürlich erst bei instationärer Betrachtung zu tragen.

$$L_T \cdot (\Theta_i - \Theta_e) + L_V \cdot (\Theta_i - \Theta_e) = \Phi_s + \Phi_i + \Phi_h \quad (3.1)$$

$$\Theta_i = \Theta_e + \underbrace{\frac{\Phi_s + \Phi_i}{L_T + L_V} + \frac{\Phi_h}{L_T + L_V}}_{\Delta\Theta} \quad (3.2)$$

$$\Theta_i = \Theta_e + \frac{\Phi_s + \Phi_i}{L_T + L_V} - \frac{\Phi_k}{L_T + L_V}$$

$$\Theta_i = \Theta_e + \frac{\Phi_s + \Phi_i}{L_T + L_V}$$

Durch Umformen der stationären Wärmebilanzgleichung wird die interessierende Innenlufttemperatur extrahiert (Formel 3.2). Wenn Wärmegewinne durch Heizleistung bzw. Wärmeverluste durch Kühlleistung vernachlässigt werden, ergibt sich eine einfache Gleichung, bei der alle Variablen bekannt sind:  $\Theta_e$  als Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur des Sommertages, z. B. für österreichische Standorte frei verfügbar unter [82]. Für die Ermittlung von  $\Phi_s$ , die mittleren Wärmegewinne durch solare Einstrahlung an einem Sommertag, kann man sich z. B. des frei zugänglichen Klimadatenrechners<sup>2</sup> bedienen. Dieser gibt die mittleren monatlichen Tagessummen der solaren Einstrahlung ( $\text{Wh/m}^2$ ) auf beliebig orientierte Flächen aus. Für jede transparente Fläche muss diese entsprechend ihrer Neigung und Orientierung ermittelt und mit dem jeweiligem  $g$ -Wert des Glases multipliziert werden, um die Wärmegewinne im Raum selbst durch solare Einstrahlung zu erhalten. Der Transmissionsleitwert  $L_T$  ergibt sich aus der Summe aller Bauteilleitwerte der Hülle (inkl. Fenster), die sich wiederum aus Multiplikation der jeweiligen Bauteilflächen mit deren  $U$ -Werten ergeben. Der Lüftungsleitwert ergibt sich aus  $L_V = \rho_a \cdot c_a \cdot n_L \cdot V$  (vgl. [100]), wobei  $c_a$  mit  $1,005 \text{ kJ}/(\text{kgK})$ ,  $\rho_a$  mit  $1,292 \text{ kg}/\text{m}^3$  und  $n_L$  aus dem vereinfachten Ansatz der ÖNorm B 8110-3 [92] übernommen werden könnte, wo der Luftwechsel  $n_L$  für eine Fassaden- oder Dachebene mit  $1,50 \text{ h}^{-1}$  für zwei Fassaden- oder Dachebenen mit  $2,50 \text{ h}^{-1}$  und für drei oder mehrere Fassaden- oder Dachebenen mit  $3 \text{ h}^{-1}$  angegeben wird,  $V$  stellt das Nettovolumen des Raumes dar. Bei Betrachtung der Formeln 3.2 lassen sich folgende allgemeine Erkenntnisse gewinnen (vgl. [69]):

- Die Innenlufttemperatur ist immer abhängig von der Außenlufttemperatur. Erhöht sich der mittlere Wert der Außenlufttemperatur, so steigt in gleichem Maße die mittlere Innenlufttemperatur an.
- Bei verschwindender Kühlleistung ist der Tagesmittelwert der Innenlufttemperatur (immer) höher als der Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur.
- Bei größer werdenden Innenwärmern steigt die Innenlufttemperatur.
- Bei kleiner werdendem Transmissionsleitwert – also besser ge-

---

<sup>2</sup>Ein Online-Tool auf der Seite des Bundesministeriums für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft. Die Primärdaten stammen von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Der Datensatz umfasst die Klimadaten von dreißig Jahren (1978 bis 2007). Der Berechnungsalgorithmus wurde von Univ. Prof. Dr. Kreč, Büro für Bauphysik, Schönberg am Kamp, erstellt, das Online-Tool (Webservice) in Zusammenarbeit mit dem Autor dieser Arbeit.



dämmten Gebäuden – steigt der Tagesmittelwert der Innenlufttemperatur<sup>3</sup>.

- Bei Vergrößerung des Lüftungsleitwerts – also Erhöhung der Frischluftzufuhr – sinkt der Tagesmittelwert der Innenlufttemperatur.

### 3.2.2 Vereinfachtes Verfahren der ÖNorm B 8110-3

Die ÖNorm B 8110-3 [92] erlaubt die Verwendung des vereinfachten Verfahrens unter folgenden Bedingungen:

1. Der Tagesmittelwert der Außentemperatur darf höchstens 23 °C betragen.
2. Sämtliche Fenster des als kritisch eingestuften Einzelraumes können nachts offen gehalten werden.

In Anbetracht, dass das vereinfachte Verfahren aufgrund oben genannter Beschränkungen und simplifizierter Berechnungsansätze keine allgemeingültige Planungssicherheit hinsichtlich der sommerlichen Überwärmung von Räumen bieten kann, gibt es in der aktuellen Fassung der OIB-Richtlinie 6:2015 einen evidenten Rückschritt: Wie folgender Auszug verdeutlicht, kann der Nachweis nun – abgesehen von den nächtlich offenbaren Fenstern – bedingungslos mit dem vereinfachten Verfahren geführt werden, die Einschränkung der ÖNorm B 8110-3 wird somit ausgehebelt.

*Der sommerliche Wärmeschutz gilt für Wohngebäude als erfüllt, wenn ausreichende Speichermassen im vereinfachten Nachweis gemäß ÖNorm B 8110-3 – unbeschadet der für den Standort geltenden Außenlufttemperatur mit einer Überschreitungshäufigkeit von 130 Tagen in zehn Jahren – vorhanden sind.*

Folgend wird das vereinfachte Berechnungsverfahren, welches heute für Sommertauglichkeitsnachweise in Österreich überwiegend eingesetzt wird, beschrieben. Das Augenmerk liegt hier bei der Berechnung von Haupträumen. In Abschnitt 3.2.5 wird die vereinfachte Berechnungsmethode kritisch beleuchtet und Problempunkte werden aufgezeigt.

Bei dem vereinfachten Berechnungsansatz wird die speicherwirksame Masse und die mindesterforderliche Lüftung eines kritischen Raum-

---

<sup>3</sup>Dieser Effekt scheint auf den ersten Blick unverständlich, lässt sich jedoch leicht begründen. Wärme im Innenraum, sei sie durch solare Einträge oder interne Nutzungslasten verursacht, kann bei besser gedämmten Gebäuden auch schwerer nach außen transportiert werden (im Falle der Wärmestromrichtung hin zum Außenraum).

**Tabelle 3.2:** Mindest erforderliche immissionsflächenbezogene speicherwirksame Masse  $m_{w,I,min}$  in Abhängigkeit vom immissionsflächenbezogenen stündlichen Luftvolumenstrom  $V_{L,s}$ .

Immissionsflächenbezogener stündlicher Luftvolumenstrom $V_{L,s} [m^3/(h \cdot m^2)]$	Immissionsflächenbezogene speicherwirksame Masse $m_{w,I,min} [kg/m^2]$
$\geq 100$	$\geq 2000$
75	$\geq 4000$
50	$\geq 8000$

es ermittelt und jeweils in Bezug zu der Immissionsfläche des Raumes gesetzt. Anhand von Tabelle 3.2 kommt es dann zu einer ja/nein Entscheidung hinsichtlich Sommertauglichkeit – die berechnete speicherwirksame Masse  $m_{w,I}$  des kritischen Raumes muss größer als die mindest erforderliche speicherwirksame Masse  $m_{w,I,min}$  bei entsprechendem  $V_{L,s}$  sein.

In einem ersten Schritt werden die wirksamen Wärmekapazitäten aller raumbegrenzenden Bauteile des kritischen Raumes sowie gegebenenfalls der Einrichtung gemäß ÖNorm EN ISO 13786 [97] berechnet. Die wirksame Wärmekapazität als flächenbezogene Größe gibt an, wie viel Wärme der Bauteil bei sinusförmiger Schwankung der Oberflächentemperatur im Tagesverlauf aufnehmen und wieder abgeben kann, wobei die Amplitude der sinusförmig schwankenden Wärmestromdichte (Wirkung) auf die Amplitude der Schwankung der Oberflächentemperatur (Ursache) bezogen wird [65]. Die Norm erlaubt die Ermittlung der flächenbezogenen wirksamen Wärmekapazität für ebene Bauteile entweder genähert anhand der vereinfachten Berechnungsmethode oder exakt über die Ermittlung von Bauteilmatrizen<sup>4</sup> des Bauteils nach folgendem Ablauf [97]:

1. Bestimmung der in den Schichten des Bauteils enthaltenen Stoffe, der Dicke dieser Schichten und Festlegung der wärmetechnischen Kenngrößen dieser Stoffe.
2. Festlegung der Periodendauer der Schwankungen an den Oberflächen.
3. Berechnung der Eindringtiefe für den Stoff jeder Schicht.
4. Bestimmung der Elemente der Schichtmatrix für jede Schicht.

<sup>4</sup>In der Norm wird die Bauteilmatrix als Wärmeübergangsmatrix bezeichnet. Nach [67] ist das aber nicht treffend gewählt, da „Wärmeübergang“ für thermische Prozesse an den Bauteiloberflächen bereits besetzt ist.

5. Multiplikation der Schichtmatrizen, ausgenommen der Matrizen der Grenzschichten in der richtigen Reihenfolge, um die Bauteilmatrix des Bauteils zu erhalten.

Bei der Fragestellung der sommerlichen Überwärmung wird die Periodendauer der Schwankungen an den Oberflächen mit der Tagesperiode, also mit 86400 s festgelegt. Die periodische Eindringtiefe  $\delta$  und das für die Berechnung der Elemente der Schichtmatrix benötigte Verhältnis von Schichtdicke zu periodischer Eindringtiefe  $\xi$  sind nach Formel 2.24 bzw. 2.25 zu ermitteln. So lässt sich für jede Schicht die Schichtmatrix anhand der Formeln 3.3 [97] berechnen.

$$\begin{aligned} Z_{11} &= Z_{22} = \cosh(\xi) \cos(\xi) + j \sinh(\xi) \sin(\xi) \\ Z_{12} &= -\frac{\delta}{2\lambda} \{ \sinh(\xi) \cos(\xi) + \cosh(\xi) \sin(\xi) + j [\cosh(\xi) \sin(\xi) - \sinh(\xi) \cos(\xi)] \} \\ Z_{21} &= -\frac{\lambda}{\delta} \{ \sinh(\xi) \cos(\xi) - \cosh(\xi) \sin(\xi) + j [\sinh(\xi) \cos(\xi) + \cosh(\xi) \sin(\xi)] \} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Die Bauteilmatrix des gesamten Bauteils ergibt sich folgend aus der Multiplikation der einzelnen Schichtmatrizen laut Formel 3.4, beginnend bei der innersten Schicht. Aus den Matrixelementen  $Z_{11}$  und  $Z_{12}$  lässt sich nach Formel 3.6 die flächenbezogene wirksame Wärmespeicherkapazität des Bauteils  $X$  in  $\text{J}/(\text{Km}^2)$  ermitteln.  $X$  wird mit entsprechender Bauteilfläche (Innenabmessungen) multipliziert. Die Summierung der Speicherkapazitäten sämtlicher raumbegrenzender Bauteile ergibt die „wirksame Wärmespeicherkapazität des Raumes“. Durch Division mit einer Referenzspeicherkapazität  $c_0 = 1046,7 \text{ J}/(\text{kgK})$  (Formel 3.6) erhält man schließlich die für das vereinfachte Verfahren benötigte speicherwirksame Masse  $m_{w,B,A}$  des kritischen Raumes.

$$Z = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} = Z_N \cdot Z_{N-1} \cdots Z_3 \cdot Z_2 \cdot Z_1 \quad (3.4)$$

$$Z_s = \begin{pmatrix} 1 & -R_s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

$$X = \frac{T}{2\pi} \cdot \left| \frac{Z_{11} - 1}{Z_{12}} \right| \quad (3.6)$$

$$m_{w,B,A} = \frac{X}{c_0} \quad (3.7)$$

Die derzeit in der ÖNorm B 8110-3 verankerte Bestimmung von speicherwirksamen Massen unter Vernachlässigung der Wärmeübergangswiderstände führt nach [24] bei einigen Bauweisen zu erheblichen

Verzerrungen und sollte deshalb neu geregelt werden. Die Berechnung ohne Wärmeübergangswiderstände ist physikalisch wenig plausibel und in der Berechnungsnorm EN 13786, auf welche die ÖNorm verweist, nicht so vorgesehen. Sie würden als erstes und letztes Element nach der Darstellung in Gleichung 3.5 in die Matrixmultiplikation (Gleichung 3.4) zum Erhalt der Bauteilmatrix einfließen.

Um den solaren Wärmeeinträgen Rechnung zu tragen, wird im vereinfachten Verfahren eine fiktive Größe, die sogenannte „Immissionsfläche“  $A_I$  eingeführt. Sie ist das Produkt aus dem Verschattungsfaktor (für Umgebung, auskragende Bauteile und Laibungsrücksprung)  $F_{Sc}$ , dem Orientierungs- und Neigungsfaktor  $Z_{ON}$ , der durch die Architekturlichte gegebene Fensterfläche  $A_{AL}$  multipliziert mit dem Glasflächenanteil  $f_G$ , dem Abminderungsfaktor des beweglichen Sonnenschutzes in Kombination mit der Verglasung  $F_c$  sowie dem Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung  $g$  (Formel 3.8).

$$A_I = F_{Sc} \cdot Z_{ON} \cdot A_{AL} \cdot f_G \cdot F_c \cdot g \quad (3.8)$$

Die Immissionsfläche ist nichts anderes als eine fiktive, vertikal nach Süden orientierte, unverschattete Fläche, die im Tagesverlauf (des 15. Juli) genauso viel Strahlung in den Raum lässt wie alle Glasflächen in den raumbegrenzenden Außenbauteilen unter Berücksichtigung von deren Strahlungsdurchgang, Verschattung und Orientierung zusammen [65]. In der Fassung aus dem Jahre 1999 wurde diese Immissionsfläche zur Berücksichtigung von Personenbelegung und Wärmeabgabe sonstiger technischer Wärmequellen im Raum vergrößert – dieser Ansatz ist in der aktuellen Fassung der ÖNorm B 8110-3 nicht mehr vorhanden, womit keine internen Wärmelasten mehr berücksichtigt werden können.

Die Luftwechselzahl und der sich daraus berechnende Luftvolumenstrom lässt sich beim vereinfachten Verfahren kurzerhand tabellarisch auslesen (siehe Tab. 3.3). Die detailliertere temperaturinduzierte Berechnung des Luftvolumenstroms, wie im Anhang der Norm beschrieben, darf für das vereinfachte Verfahren nicht zur Anwendung kommen.

Die Berechnung der speicherwirksamen Masse wurde bereits detailliert in diesem Abschnitt und die Wärmespeicherung von Bauteilen allgemein in Kapitel 2.4 abgehandelt. Vor der Kritik an dem vereinfachten Verfahren in Abschnitt 3.2.5 sollen nun für eine holistische Herangehensweise noch die Berechnungsparameter der Immissionsfläche und des Luftvolumenstroms erläutert werden:

**Verschattungsfaktor  $F_{Sc}$**  : Ein Reduktionsfaktor zwischen 0 und 1. Zur Berücksichtigung dauerhafter Verschattung infolge von Horizont (Topographie), Überhängen und seitlichen Überständen bei

**Tabelle 3.3:** Anzunehmende Luftwechselzahl in Räumen in Abhängigkeit von der Lage der Lüftungsöffnungen [92].

Fassaden- od. Dachebenen mit Lüftungsöffnungen	$n_L[1/h]$
eine Fassaden- oder Dachebene	1,50
zwei Fassaden- oder Dachebenen	2,50
drei oder mehr Fassaden- oder Dachebenen	3,00

Fenstern, der der ÖNorm B 8110-6 tabellarisch für Neigungen in 30°-Schritten und für die vier Haupthimmelsrichtungen entnommen werden kann.  $F_{Sc}$  stellt jedoch als Einzahl-Wert nur eine grobe Näherung dar, da die Verschattungsfläche und damit -wirkung sehr stark von dem sich über den Tagesverlauf laufend ändernden Sonnenstand, Geometrie, Orientierung und Neigung der verschatteten Glasfläche als auch dem Verschattungsobjekt selbst abhängig ist. Die Beschreibung des Verschattungsobjektes rein durch Angabe des Neigungs- bzw. Überhangwinkels macht realitätsnahe Abbildung in vielen Fällen schwer. Laut ÖNorm EN ISO 13790 ergibt sich der Verschattungsfaktor als Quotient der mittleren Strahlung die bei Verschattung auf eine Fläche auftritt und der mittleren Strahlung bei keiner Verschattung. Der Einfluss infolge Auskragungen und Seitenteilen, wie z.B. beschattungswirksamer Vordächer, Balkone und horizontaler bzw. vertikaler Lamellenblenden, kann gemäß ÖNorm EN ISO 13791, Anhang C, berücksichtigt werden oder alternativ darf für die Verschattung ( $F_{Sc}$ ) infolge Auskragungen und Seitenteilen jeweils ÖNorm B 8110-6, Tabelle 12, Tabelle 13 und Tabelle 14, Spalte Sommer herangezogen werden. Die tabellarisch angegebenen Werte der österreichischen Norm überschätzen die tatsächliche Verschattung, was durch Vergleichsrechnungen und Vergleiche mit Normen wie der DIN V 18599-2:2016 belegt werden kann. Dadurch werden solare Einträge und in weiterer Folge sommerliche Raumtemperaturen bei Verwendung dieser tabellarischen Verschattungsfaktoren unterschätzt.

**Orientierungs- und Neigungsfaktor  $Z_{ON}$**  : Beschreibt die Abhängigkeit des Strahlungseintrags von der Orientierung und Neigung der Glasfläche. Zur Erläuterung wurden die Strahlungssummen der Globalstrahlung [ $Wh/m^2$ ] für den 15. Juli für den Stand-

ort Wien, Hohe Warte für die angegebenen Flächen mit dem Programm SolRad3 [61] gegengerechnet, welches die vollständige Berechnung der Sonneneinstrahlungsintensitäten aus der Angabe von Datum, Uhrzeit, geografischer Lage, Flächenorientierung und wenigen meteorologischen Parametern gestattet [44]. In Tabelle 3.4 sind die berechneten Globalstrahlungssummen für entsprechende Neigungen und Orientierungen angegeben und jeweils durch den Globalstrahlungswert für die südorientierte Vertikalfläche dividiert – es ergeben sich exakt die Werte, welche als  $Z_{ON}$  in der Norm angegeben sind.

**Fensterfläche  $A_{AL}$  und Glasflächenanteil  $f_G$**  : Fensterfläche [m<sup>2</sup>], spezifiziert durch die Architekturliche und der Glasflächenanteil um den Rahmenanteil zu berücksichtigen.

**Abminderungsfaktor  $F_c$**  : Früher als  $z$ -Wert bezeichneter Abminderungsfaktor des beweglichen Sonnenschutzes in Kombination mit der Verglasung. Die Wirksamkeit der Sonnenschutzeinrichtung ist wie in der ÖNorm B 8110-3 vorgeschrieben gemäß ÖNorm EN 13363-1 bzw. ÖNorm EN 13363-2 in Abhängigkeit von deren Lage, der solaren Transmission, Absorption und der Reflexion der Sonnenschutzeinrichtung sowie vom U-Wert und g-Wert der jeweiligen Verglasung zu berechnen. Die Norm gibt im Anhang typische Kenngrößen für Sonnenschutzvorrichtungen an.

**Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung  $g$**  : Die Größe der durch das Glas durchgelassenen Solarstrahlung ist abhängig deren Einfallswinkel. Dieser Effekt ist bei detaillierten Berechnungsverfahren in der Regel über den Exponenten  $\varepsilon$  berücksichtigt. Im vereinfachten Verfahren wird vom senkrechten Einfallswinkel ausgegangen, was somit den Maximalwert des Durchlassgrades und den kritischen Fall darstellt. Die Norm gibt im Anhang optische und thermische Kenngrößen von typischen Verglasungen an.

**Luftwechselzahl  $n_L$**  : Abhängig von der Anzahl der Fassaden- oder Dachebenen mit Lüftungsöffnung in [h<sup>-1</sup>] angegeben. Die Norm selbst vermerkt, dass es eine reine Rechengröße darstellt und auf keinem besonderen physikalischen Hintergrund basiert. Das detaillierte Verfahren zur Berechnung des temperaturinduzierten Luftvolumenstroms darf laut Norm für das Vereinfachte Verfahren nicht angewendet werden. Bei Vergleichsrechnungen ergibt sich in der Regel ein höherer Luftwechsel anhand des detaillierten Verfahrens im Vergleich zu den Tabellenwerten, was den Grund darstellen könnte. Die Parameter zur Berechnung des temperaturinduzierten Luftvolumenstroms werden dabei vernachlässigt: Lüftungsöffnungsfläche, Höhe der Lüftungsöffnung als auch die

**Tabelle 3.4:** Jeweils in erster Zeile die Strahlungssummen der Globalstrahlung [Wh/m<sup>2</sup>] für den 15. Juli für den Standort Wien, Hohe Warte für entsprechende Neigung der Flächennormale und Orientierung, in zweiter Zeile die jeweilige Globalstrahlung dividiert durch den Wert der Globalstrahlung der südorientierten Vertikalfäche (Orientierung: 180 °C, Neigung: 0 °C).

Neigung	Orientierung							
	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
0°	2040,8 0,54	3089,3 0,82	4235,0 1,13	4305,8 1,14	3761,3 1	4305,8 1,14	4234,9 1,13	3089,2 0,82
30°	3206,8 0,85	4340 1,15	5808,1 1,54	6379,1 1,70	6338,9 1,69	6379 1,70	5808 1,54	4339,9 1,15
45°	4741 1,26	5259,7 1,40	6503,1 1,73	7152,6 1,9	7255,7 1,93	7152,6 1,9	6503,1 1,73	5259,6 1,4
60°	6064,8 1,61	6330,4 1,68	7101,1 1,89	7661,6 2,04	7818,6 2,08	7661,6 2,04	7101,1 1,89	6330,4 1,68
90°	7740,6 2,06							

Lufttemperaturdifferenz zwischen Außenluft und Innenluft.

Das vereinfachte Verfahren der ÖNorm B 8110-3 ist – vor allem bei Verwendung des vereinfachten Berechnungsansatzes zur Ermittlung der speicherwirksamen Masse – ein einfacher und schneller Weg zur Abschätzung der sommerlichen Überhitzung, der auch der Handrechnung zugänglich ist. Speziell durch die Lockerung in der aktuellen Fassung der OIB-Richtlinie 6:2015 [83], die die uneingeschränkte Nutzung dieses vereinfachten Verfahrens zum Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes für Wohnbauten erlaubt, sowie durch Änderungen in der ÖNorm B 8110-3:2012 gegenüber der Vorgängerversion (z. B. Wegfall der internen Wärmelasten als Vergrößerung der Immissionsfläche) leidet jedoch die Planungssicherheit hinsichtlich sommerlicher Überwärmung. Es ergeben sich einige problematische Punkte, die in Abschnitt 3.2.5 behandelt werden.

Auf Basis der Verdeutlichung der Problempunkte in Abschnitt 3.2.5 wird empfohlen, vom vereinfachten Verfahren abzusehen und das detaillierte Verfahren für den Nachweis anzuwenden, um Planungssicherheit gewährleisten zu können. Um dadurch keinen Mehraufwand zu erfahren, wird im Zuge der Arbeit ein intuitives Online Werkzeug entwickelt, das Einfachheit und Schnelligkeit beibehält, jedoch auf einem detaillierten Berechnungsverfahren basiert. Dieses Instrument für sommertaugliche Entwurfsfindung und Nachweis wird in Kapitel 6.2 vor-

gestellt.

### 3.2.3 Verfahren anhand Sonneneintragskennwerte der DIN 4108-2

Das Sonneneintragskennwerteverfahren stellt ein vereinfachtes Verfahren mit standardisierten Randbedingungen dar. Für den zu bewertenden Raum oder Raumbereich ist der vorhandene Sonneneintragskennwert zu bestimmen und dem ermittelten maximal zulässigen Sonneneintragskennwert gegenüberzustellen. Der Nachweis der Einhaltung der Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz ist erbracht, wenn der vorhandene Sonneneintragskennwert den zulässigen Sonneneintragskennwert nicht übersteigt ( $S_{\text{vorh}} \leq S_{\text{zul}}$ ).

Im vorhandenen Sonneneintragswert ( $S_{\text{vorh}}$ ) sind das Verhältnis des Fensterflächenanteils ( $A_W$ ) und des Gesamtenergiedurchlassgrades ( $g_{\text{tot}}$ ) an der Nettogrundfläche des Raumes ( $A_G$ ) enthalten (siehe Formel 3.9).

$$s_{\text{vorh}} = \frac{\sum_j A_{W,j} \cdot g_{\text{tot},j}}{A_G} \quad (3.9)$$

Im zulässigen Sonneneintragswert ( $S_{\text{zul}}$ , siehe Formel 3.10) sind Teilfaktoren enthalten, die sich wiederum aus den Bauteilcharakteristika wie der Bauweise ( $C_{\text{wirk}}/A_G$ ), der Intensität der Nachtlüftung ( $n$ ), dem Fensterflächenanteil bezogen auf die Grundfläche ( $f_{WG}$ ) und der Art, Ausrichtung und Neigung der Fenster zusammensetzen (siehe Abb. 3.2).

$$s_{\text{zul}} = \sum S_X \quad (3.10)$$

### 3.2.4 Verfahren der SIA 180

Die beiden vereinfachten Verfahren zum Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes nach der Schweizer Norm SIA 180 werden folgend kurz umrissen.

#### 3.2.4.1 Verfahren 1

Das Verfahren 1 fordert die Einhaltung einiger Bedingungen – wenn diese erfüllt sind, ist keine Berechnung notwendig. Folgende Kriterien sind Bedingung für den Nachweis anhand des Verfahrens 1 [114]:



Nutzung		Anteiliger Sonneneintragskennwert $S_x$						
		Wohngebäude			Nichtwohngebäude			
Klimaregion		A	B	C	A	B	C	
S <sub>1</sub>	Nachtlüftung und Bauart							
	Nachtlüftung	Bauart						
	ohne	leicht	0,071	0,056	0,041	0,013	0,007	0,000
		mittel	0,080	0,067	0,054	0,020	0,013	0,006
		schwer	0,087	0,074	0,061	0,025	0,018	0,011
	erhöhte Nachtlüftung mit $n \geq 2 \text{ h}^{-1}$	leicht	0,098	0,088	0,078	0,071	0,060	0,048
		mittel	0,114	0,103	0,092	0,089	0,081	0,072
		schwer	0,125	0,113	0,101	0,101	0,092	0,083
	hohe Nachtlüftung mit $n \geq 5 \text{ h}^{-1}$	leicht	0,128	0,117	0,105	0,090	0,082	0,074
		mittel	0,160	0,152	0,143	0,135	0,124	0,113
schwer		0,181	0,171	0,160	0,170	0,158	0,145	
S <sub>2</sub>	Grundflächenbezogener Fensterflächenanteil $f_{\text{WG}}$							
	$S_2 = a - (b \cdot f_{\text{WG}})$	a	0,060			0,030		
		b	0,231			0,115		
S <sub>3</sub>	Sonnenschutzglas							
	Fenster mit Sonnenschutzglas mit $g \leq 0,4$		0,03					
S <sub>4</sub>	Fensterneigung							
	$0^\circ \leq \text{Neigung} \leq 60^\circ$ (gegenüber der Horizontalen)		$-0,035 f_{\text{neig}}$					
S <sub>5</sub>	Orientierung							
	Nord-, Nordost- und Nordwest-orientierte Fenster soweit die Neigung gegenüber der Horizontalen $> 60^\circ$ ist sowie Fenster, die dauernd vom Gebäude selbst verschattet sind		$+0,10 f_{\text{nord}}$					
S <sub>6</sub>	Einsatz passiver Kühlung							
	Bauart							
	leicht		0,02					
	mittel		0,04					
schwer		0,06						

**Abbildung 3.2:** Anteilige Sonneneintragskennwerte zur Bestimmung des zulässigen Sonneneintragskennwertes [11].

- Dachflächenfenster oder Oberlichter haben einen Sonnenschutz und eine Fläche von weniger als 5% der Nettogeschosfläche des betrachteten Raumes.
- Der U-Wert des Dachs beträgt maximal  $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .
- Bei allen Fenstern ist ein außen liegender, beweglicher Sonnenschutz vorhanden.
- Sonnenschutz mit Windwiderstandsklasse 6 (92 km/h).
- Der Gesamtenergiedurchlassgrad  $g_{\text{tot}}$  (Verglasung und Sonnenschutz) aller Fenster beträgt maximal 0,10.
- Die Raumtiefe beträgt bei jedem Fenster mindestens 3,5 m (bei

**Tabelle 3.5:** Maximale Glasanteile für einen einfachen Nachweis des Wärmeschutzes in der warmen Jahreszeit nach SIA 180 [113].

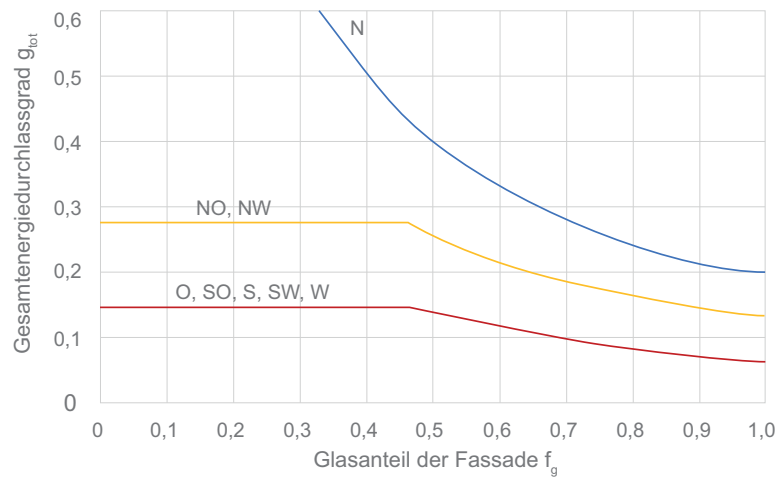
Raumkategorie	Fenster an	Glasanteil für Sonnenschutz mit Bedienung	
		manuell	automatisch
Wohnen hohe Wärmespeicherfähigkeit	einer Fassade	50 %	70 %
	mehreren Fassaden	30 %	50 %
Wohnen mittlere Wärmespeicherfähigkeit	einer Fassade	40 %	60 %
	mehreren Fassaden	30 %	40 %
Büro, etc. mittlere Wärmespeicherfähigkeit	einer Fassade		30 %
	mehreren Fassaden		40 %
Büro, etc. hohe Wärmespeicherfähigkeit	einer Fassade		40 %
	mehreren Fassaden		30 %

gegenüberliegenden Fenstern mindestens 7 m).

- Die Wärmespeicherfähigkeit jedes Raumes ist mindestens „mittel“. Dies ist lediglich durch eine Beschreibung der Bauweise definiert. Leichtbauweisen in Holz oder Metall, ohne schwere Schichten, werden als „leicht“ eingestuft und können somit nicht mit Verfahren 1 nachgewiesen werden.
- Die maximalen Glasanteile jedes Raumes liegen unter den Werten der Tabelle 3.5.
- Eine effiziente Nachtauskühlung durch natürliche Lüftung muss möglich sein: Außenluftvolumenstrom pro Nettogeschosfläche mindestens  $10 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$  (Querschnittsfläche der Öffnungen mindestens 5 % der Nettogeschosfläche des Raumes, eine Abluftöffnung an höchstmöglicher Stelle des Raumes. Kann alternativ durch eine entsprechend dimensionierte mechanische Lüftung erreicht werden).

### 3.2.4.2 Verfahren 2

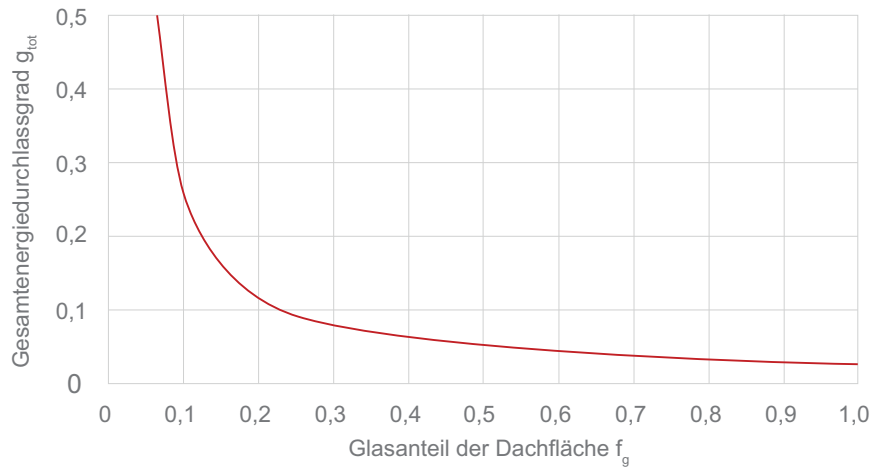
Bei Verfahren 2 muss neben der effizienten Nachtauskühlung nachgewiesen werden, dass der Sonnenschutz die Anforderungen erfüllt. Wärmeschutz und effektive Wärmespeicherfähigkeit der Bauteile müssen ebenso berechnet werden und den Anforderungen genügen. Zusammengefasst sind folgende Kriterien Bedingung für die Durchführung des



**Abbildung 3.3:** Anforderungen an den Gesamtenergiedurchlassgrad  $g_{tot}$  von Fassadenfenstern (Verglasung und Sonnenschutz) je nach Glasanteil der Fassade und ihrer Orientierung. Vgl. SIA 180 [113].

Nachweises mit Verfahren 2 [114]:

- Fassadenfenster müssen die Anforderungen an den Gesamtenergiedurchlassgrad  $g_{tot}$  gemäß Abbildung 3.3 einhalten.
- Der Sonnenschutz muss die empfohlene Windwiderstandsklasse gemäß SIA 342 einhalten. Die innere Oberflächentemperatur in der Glasmitte darf mit Sonnenschutz max. 5 K über der Raumlufttemperatur liegen.
- Dachflächenfenster und Oberlichter müssen zusammen mit dem Sonnenschutz die Anforderung an den Gesamtdurchlassgrad gemäß Abbildung 3.4 einhalten.
- Dachkonstruktionen über bewohnten Dachräumen müssen  $U_{24} \leq 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  einhalten.
- Die Wärmespeicherfähigkeit  $C_R/A_{NGF}$  muss mind.  $45 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$  betragen. Nachweis gemäß EN ISO 13786 für eine 24h Periodendauer.
- Abgehängte Decken müssen bei der Berechnung der Wärmespeicherfähigkeit wie in der Norm beschrieben berücksichtigt werden.
- Eine effiziente Nachtauskühlung durch natürliche Lüftung muss möglich sein: Außenluftvolumenstrom mindestens  $10 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$  (Querschnittsfläche der Öffnungen mindestens 5% der Nettogeschosfläche des Raumes, eine Abluftöffnung an höchstmöglicher Stelle des Raumes. Kann alternativ durch eine entsprechend dimensionierte mechanische Lüftung erreicht werden).



**Abbildung 3.4:** Anforderungen an den Gesamtenergiedurchlassgrad  $g_{tot}$  von Dachfenstern (Verglasung und Sonnenschutz) je nach Glasanteil der Fassade. Vgl. SIA 180 [113].

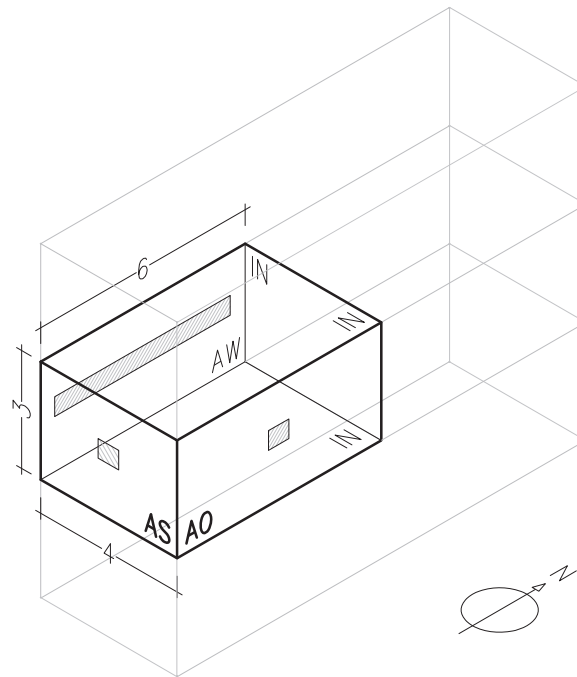
### 3.2.5 Problempunkte vereinfachter Verfahren

Bei vereinfachten Verfahren werden in der Regel komplex ablaufende physikalische Vorgänge vereinfacht abgebildet, des Öfteren Einflüsse schlicht vernachlässigt, meist mit dem Ziel Ergebnisse durch (Hand-) Rechnung ermitteln zu können. Aufgrund unterschiedlich gearteter vereinfachter Verfahren ist eine allgemeine Beurteilung und Beschreibung der Problempunkte nicht möglich. Deshalb soll an dieser Stelle in erster Linie auf Problempunkte des vereinfachten Verfahrens der ÖNorm B 8110-3 eingegangen werden, das nach OIB-Richtlinie 6:2015 für Wohnbauten uneingeschränkt verwendet werden kann. Die Problempunkte sind vorwiegend jene, die folgend aufgelistet und in späterer Folge detailliert und anhand von Beispielrechnungen demonstriert werden.

- Unabhängigkeit von der für den Standort geltenden Außenlufttemperatur.
- Vernachlässigung von internen Wärmeeinträgen wie Personen oder Geräten und Beleuchtung.
- Voraussetzung natürlicher Nachtlüftung durch vollständig geöffnete Fenster.
- Nur „Ja“ oder „Nein“ Entscheidung, d. h. keine Information über Raumtemperaturverlauf und vorherrschende Temperaturmaxima.

Um die genannten Problempunkte des vereinfachten Verfahrens zu verdeutlichen, werden Untersuchungen an einem hinsichtlich solaren Wärmeeinträgen und Lüftung äußerst ungünstigem, aber durchaus

realistischen Raum durchgeführt, der nach dem vereinfachten Normverfahren Sommertauglichkeit aufweist. Vergleichsrechnungen werden mit dem periodisch eingeschwungenen Gebäudesimulationsprogramm Geba durchgeführt. Zur Auswahl eines kritischen Raumes wird Tabelle 3.2 herangezogen, die neben den „Standardbereichen“ auch zwei Grenzfälle zulässt: entweder ein Raum mit geringem Luftvolumenstrom (für die Nachtlüftung) und relativ hoher speicherwirksamer Masse, oder ein Raum mit hohem Luftvolumenstrom, jedoch geringerer speicherwirksamer Masse. Die untere Grenze des immissionsflächenbezogenen stündlichen Luftvolumenstroms  $V_{L,s}$  beträgt  $50 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ , wobei dann eine immissionsflächenbezogene speicherwirksame Masse  $m_{w,l,\min}$  von mehr als  $8000 \text{ kg/m}^2$  für Sommertauglichkeit notwendig wird. Anhand der Erkenntnis einer Reihe thermischer Gebäudesimulationen stellt sich aber in der Regel eine höhere operative Raumtemperatur bei dem anderen Grenzfall ein, nämlich der kleinstzulässigen  $m_{w,l,\min}$  ( $\geq 2000 \text{ kg/m}^2$ ), wobei dann normgemäß ein  $V_{L,s}$  von  $\geq 100 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$  gefordert wird. Folglich wird ein Raum analysiert, der diese Eigenschaften aufweist ( $V_{L,s} \approx 100 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ ,  $m_{w,l,\min} \approx 2000 \text{ kg/m}^2$ ), wie z. B. ein Raum mit den Innenabmessungen  $6 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ , dargestellt in Abb. 3.5. Er grenzt über drei Wände – im Osten, Süden und Westen – an den Außenraum, die restlichen raumumschließenden Bauteile grenzen an „dem Simulationsraum ähnliche“ Nachbarräume. Die Fenster werden für diesen ungünstigen Fall als Bänder geringer Höhe (50 cm) modelliert, was zu weniger Luftwechsel bei der Nachtlüftung führt und damit die Überhitzung fördert. Wie von der Norm gefordert, werden sämtliche Fenster zur natürlichen Nachtlüftung verwendet (20:00-08:00). Die ost- und südorientierten Fenster weisen eine Breite von 60 cm, das westorientierte Fenster eine Breite von 515 cm auf. Sie bestehen aus zweifachverglastem Wärmeschutzglas (u-Wert:  $1,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , g-Wert: 0,6). Der hygienische Luftwechsel ist mit  $0,3 \text{ h}^{-1}$  gewährleistet. Es wird keine Leistenverschattung (Laibung, Sturz) angenommen, also von außenliegenden Fenstern ausgegangen. Fensterrahmen wurden zur Simplifizierung des Demonstrationsbeispiels vernachlässigt, jedoch ergäben 10 cm starke Hartholzrahmen eine ähnliche speicherwirksame Masse wie die gewählten Bauteile. Aus der angenommenen Raumgeometrie und der berechneten Immissionsfläche ( $2,16 \text{ m}^2$ ) ergibt sich eine mindestgeforderte spezifische speicherwirksame Masse der opaken raumbegrenzenden Bauteile von  $41,2 \text{ kg/m}^2$ . Bei Wänden wäre das z. B. eine massiv anmutende, in der österreichischen Baupraxis oft eingesetzte, verputzte monolithische Hochlochziegelwand  $d = 38 \text{ cm}$ ,  $\rho = 575 \text{ kg}$ ,  $\lambda = 0,085 \text{ W}/(\text{mK})$ ,  $c = 1 \text{ kJ}/(\text{kgK})$ , die über einen U-Wert von  $0,21 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  verfügt. Der Raum weist damit ins-

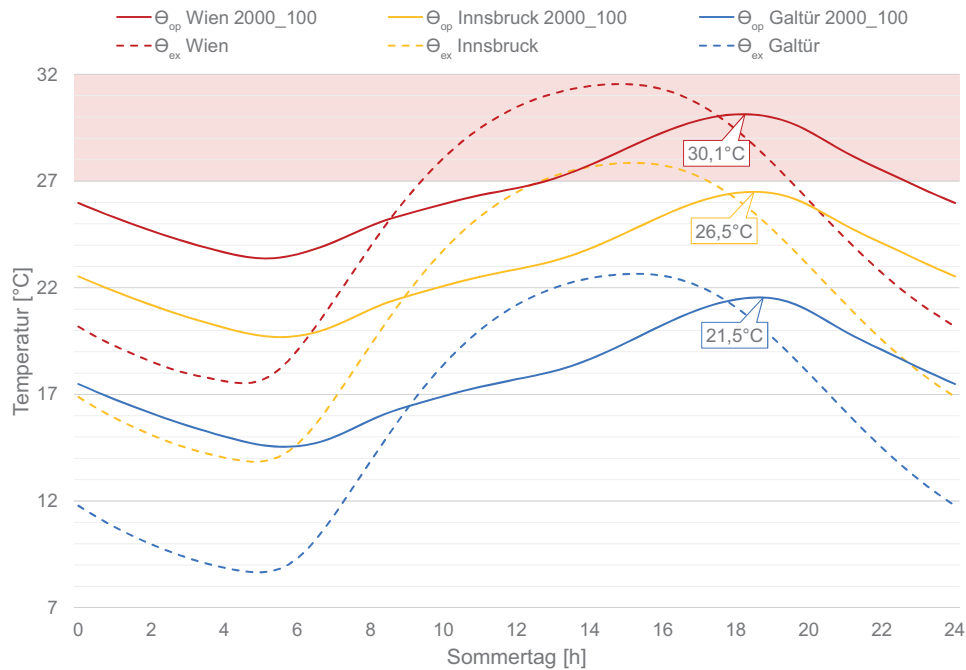


**Abbildung 3.5:** Simulationsraum zur Kritik des vereinfachten Verfahrens der ÖNorm B 8110-3:2012. Innenabmessungen  $6\text{ m} \times 4\text{ m} \times 3\text{ m}$ . Außenwand Ost (AO), Außenwand Süd (AS), Außenwand West (AW), adiabate Bauteile an ähnliche Räume: IN.

gesamt  $4367,65\text{ kg}$ , bei  $2,16\text{ m}^2$  Immissionsfläche also normgemäß mehr als  $2000\text{ kg/m}^2$  speicherwirksame Masse bei einem immissionsflächenbezogenen Luftvolumenstrom von mehr als  $100\text{ m}^3/(\text{hm}^2)$  auf und ist nach dem vereinfachten Verfahren sommertauglich.

Um auch die Problematik der Unabhängigkeit von der Außenlufttemperatur aufzuzeigen, wird die Gebäudesimulation des Raumes für drei verschiedene Orte in Österreich durchgeführt: Wien, Innere Stadt mit vergleichsweise hohen sommerlichen Außentemperaturen (NAT-T13<sup>5</sup> =  $24,9\text{ °C}$ ), Innsbruck als sommerlich kühle Landeshauptstadt (NAT-T13 =  $21,2\text{ °C}$ ) sowie zur Demonstration des großen Einflusses der geografischen Position und Seehöhe Galtür in Tirol (NAT-T13 =  $16,0\text{ °C}$ ). Die Ergebnisse der thermischen Gebäudesimulation sind in Abb. 3.6 dargestellt.

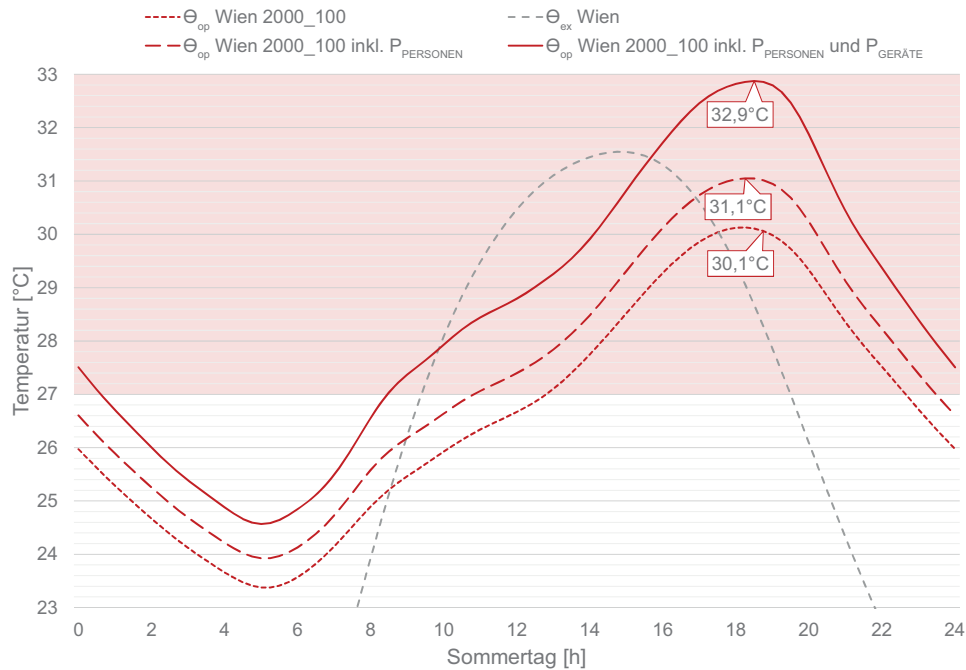
<sup>5</sup>NAT-T13: Normaußentemperatur, mit einer durchschnittlichen Überschreitungshäufigkeit von 13 Tagen im Jahr. Die Ermittlung des Tagesmittelwertes für die Berechnung ist in ÖNorm B 8110-5 Bbl 2 angeführt und die Tagesschwankung der Außenlufttemperatur sind der ÖNorm B 8110-3 in stündlichen Werten tabellarisch zu entnehmen.



**Abbildung 3.6:** Tagesgang der operativen Temperatur im Demonstrationsraum ( $V_{L,s} \approx 100 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$ ,  $m_{w,l,\min} \approx 2000 \text{ kg/m}^2$ ) vorerst ohne Berücksichtigung interner Wärmelasten an drei verschiedenen Standorten.

Am Standort Innsbruck ergibt sich laut Gebäudesimulation ein Maximum der operativen Raumtemperatur von  $26,5^\circ\text{C}$ , womit der Raum auch nach detailliertem Verfahren sommertauglich wäre ( $t_{\text{op,Max}} \leq 27^\circ\text{C}$ ). Simuliert man den Raum am Standort Galtür führt das zu einer  $t_{\text{op,Max}}$  von  $21,5^\circ\text{C}$ . Die  $t_{\text{op,Max}}$  des identischen Raumes mit selber Ausrichtung, jedoch am Standort Wien, Innere Stadt ergibt  $30,1^\circ\text{C}$  und ist damit  $3,1\text{K}$  über dem normgemäß zulässigen Maximum der operativen Raumtemperatur. Und das bereits ohne jegliche Raumnutzung, es sind noch keine Wärmelasten durch Personen, Geräte oder Beleuchtung berücksichtigt. Unterschiede der Maxima der operativen Raumtemperaturen aufgrund unterschiedlicher Standorte in Österreich und damit unterschiedlicher Außenlufttemperaturen sind demnach durchaus in der Größenordnung von  $9\text{K}$ . Bereits beim Vergleich der Landeshauptstädte ergeben sich Unterschiede von  $3,6\text{K}$ .

Die ÖNorm B 8110-3 gibt für die detaillierte Berechnung den Tagesverlauf von inneren Lasten durch Personen und Geräte zusammen mit der Beleuchtung für Aufenthaltsräume in stündlichen Werten tabellarisch vor. Diese Werte stellen laut Norm nur die minimal anzunehmenden inneren Lasten dar und können je nach Raumnutzung und Nut-



**Abbildung 3.7:** Tagesgang der operativen Temperatur im Demonstrationsraum mit Berücksichtigung normgemäßer (minimaler) interner Wärmelasten am Standort Wien, Innere Stadt.

zerverhalten höher sein. Unter Berücksichtigung dieser Minimallasten erhöhen sich die operativen Temperaturen des Demonstrationsraumes am Standort Wien, Innere Stadt wie in Abb. 3.7 dargestellt.

Die Vergleichsrechnungen mit einem thermischen Gebäudesimulationsprogramm basierend auf dem periodischen Ansatz, welcher in Kapitel 3.3.2 im Detail erläutert wird, scheint sinnvoll, da es einerseits der Methode der ÖNorm B 8110-3 entspricht und zum anderen eine exakte analytische Berechnung zulässt. Die Kritik, dass es aufgrund des periodischen Ansatzes unter Verwendung von NAT-T13 Randbedingungen realitätsfern ist und einen kaum erreichbaren kritischen Zustand entspricht ist nicht zutreffend: Die Langzeit-Phasenverschiebung (Jahresperiode) des gewählten Wandbaufbaus des Demonstrationsraumes beträgt zum Beispiel 6,8 Tage und ist somit in einer sommerlichen Hitzeperiode durchaus erreichbar.

Das Demonstrationsbeispiel stellt ohne Zweifel einen ungünstig gewählten Fall dar, zeigt jedoch die allgemeinen Problempunkte des vereinfachten Verfahrens auf gute Weise. Der durchaus realistische Raum weist normgemäß Sommertauglichkeit auf, erreicht jedoch maximale operative Raumtemperaturen um 32,9 °C, also fern jeglichen Komfort-



bereichs. Problematisch erweist sich die Nichtberücksichtigung des Außenklimas, die Verwendung verallgemeinerter Werte für den Luftwechsel (kein Einfluss der Fenstergröße) und vor allem auch die Vernachlässigung von internen Wärmelasten. Zudem wird nach dem vereinfachten Verfahren die Nachtlüftung vorausgesetzt, was an vielen, vor allem städtischen Standorten aufgrund von Sicherheits- oder Lärmproblematik, teilweise auch aus Witterungsgründen unmöglich ist. In [4] werden u. a. auch der nicht geregelte Luftwechsel bei nicht vollständig geöffneten Fenstern sowie die fehlende Möglichkeit der Angabe zur Wirkung von Lüftungsanlagen kritisiert.

Um die Größenordnung der Auswirkung der nächtlichen Lüftung zu veranschaulichen sei an dieser Stelle trotz Normunzulässigkeit noch das Maximum der operativen Temperatur des Demonstrationsraumes bei geschlossenen Fenstern (keine Nachtlüftung) angegeben: 51,1 °C.

Diese Untersuchungen zeigen auf, dass durch das vereinfachte Verfahren die tatsächliche sommerliche Überhitzung zum Teil weit unterschätzt wird und nur das detaillierte Verfahren realitätsnahe Ergebnisse liefern kann. Eine einfache Möglichkeit des detaillierten Nachweises wird in in Kapitel 6.2 vorgestellt.

### 3.3 Instationäre Simulationsverfahren

Zeitabhängige Beschreibungen physikalischer Vorgänge und zugehörige Berechnungen bezeichnet man als instationär. Um detaillierte Informationen über das thermisch dynamische Verhalten eines Raumes zu erhalten, kommen demnach instationäre Berechnungs- bzw. Simulationsverfahren zum Einsatz. Erst dadurch können die zum Teil komplexen Zusammenhänge möglichst realitätsnahe, d. h. physikalisch und in ihrem zeitlichen Verlauf korrekt, abgebildet werden. Der wesentliche Vorteil einer dynamischen Simulationsrechnung gegenüber (stationären) vereinfachten Verfahren ist also, dass eine Prognose für ein geplantes Gebäude zeitabhängig und damit abhängig von Tagesgängen von Umgebungsbedingungen (Außenlufttemperaturen, Sonneneinstrahlung), Lüftungsverhalten und inneren Wärmequellen, unter Berücksichtigung von Raumgeometrie und Baustoffen abgebildet werden können (vgl. [101]).

Das thermische Gebäudemodell setzt sich nach [76] im Wesentlichen aus den beiden Teilmodellen für Konvektion und Strahlung im Raum und für Wärmedurchgang durch Wände und Fenster zusammen. Die Bilanzierung wird innerhalb von festgelegten thermischen Zonen<sup>6</sup>

---

<sup>6</sup>Zonen können einen Raum, eine Raumgruppe oder auch ganze Gebäude darstellen.

durchgeführt (siehe Abschnitt 2.7). Für die Lösung der Wärmebilanz innerhalb einer Zone gib es verschiedene Ansätze (vgl. [76]):

- Komplexe Netzwerkmodelle bilden die physikalischen Zusammenhänge sehr genau ab. Räumliche Einstrahlverhältnisse der Wärmestrahlung können dabei berücksichtigt werden. Die Eingabe eines geometrischen 3D-Gebäudemodells ist dafür notwendig.
- Vereinfachte Stern- oder Temperaturknotenmodelle sind Wärmebilanzmodelle in denen der langwellige Strahlungsaustausch zwischen den Wänden und die konvektive Wärmeübertragung an die Raumluft jeweils durch fiktive Temperaturknoten repräsentiert wird (2-Stern-Modell). Bei weiterer Vereinfachung werden die beiden Temperaturknoten für Strahlung und Konvektion zu einem Temperaturknoten kombiniert (1-Stern-Modell).

Nach VDI<sup>7</sup>-Richtlinie 6020 [120] sind im Wesentlichen drei Methoden gebräuchlich, die nach der Art und Weise der Berechnung des dynamischen oder instationären Wandverhaltens wie folgt eingeteilt werden können:

- Methoden der finiten Differenzen.
- Methoden mit Gewichtungsfaktoren.
- Methoden mit Ersatzmodellen.

Diese Verfahren sind auch zurzeit die in Simulationsprogrammen am häufigsten verwendeten Methoden. Für eine überblicksmäßige Beschreibung der Methoden sei auf [120] verwiesen.

Bei den Wärmebilanzverfahren wird des Weiteren unterschieden, ob die Wärmebilanzgleichung im Zeitbereich oder im Frequenzbereich gelöst wird (siehe Abschnitt 2.7). Je nach Fragestellung eignet sich das eine oder andere Verfahren besser. Der Großteil der Simulationsprogramme bedient sich sogenannter Zeitschrittverfahren, einige wenige bedienen sich der periodisch eingeschwungenen Methode im Frequenzbereich. Beide Arten werden folgend kurz erläutert, die Bilanzierung der beiden Verfahren wird in Abschnitt 2.7.2 behandelt. Eine Auswahl typischer Gebäudesimulationsprogramme wird in Abschnitt 4.2 vorgestellt.

### 3.3.1 Zeitschrittverfahren

Die Berechnung der Raumtemperatur erfolgt in der Regel im Stundenschritt (oder in einem geraden Bruchteil davon) als Stundenmittelwert. Beginn und Ende des Wirkens der Aktionsgrößen aus gebäudeinneren

---

<sup>7</sup>VDI = Verein Deutscher Ingenieure.

Wärmequellen und -senken sowie Temperaturen sind deshalb in Stundenschritten (als Mittelwerte) zu formulieren [120]. Bei den Stundenbilanzverfahren wird demnach die Wärmebilanz des Raumes oder des Gebäudes zu jedem Zeitschritt gelöst, und fließt als Ergebnis in den darauffolgenden Zeitschritt ein. Im Gegensatz zum periodisch eingeschwungenen Verfahren im Frequenzbereich wird hier auch die Festlegung von Anfangsbedingungen (Bauteilschichttemperaturen, Raumtemperaturen, etc.) notwendig. Der Einfluss der Anfangsbedingungen auf das Berechnungsergebnis klingt mit fortschreitender Zeit mehr und mehr ab. Das bedeutet aber, dass sich die instationäre Berechnung über einen entsprechend langen Zeitraum erstrecken muss, bis die Berechnung „eingelaufen“ ist (vgl. [68]). Die österreichische Norm H 6040 [95] definiert den Einschwingungszustand als beendet, wenn keine der Temperaturen zu den 24 vollen Stunden des Tages sich um mehr als 0,0001 K gegenüber den Temperaturen zu den gleichen Uhrzeiten des Vortages ändert.

Der Nachteil von Zeitschrittverfahren gegenüber frequenzbasierten Verfahren ist die hohe benötigte Rechenleistung, zum einen da für jeden Zeitschritt die Wärmebilanzgleichungen gelöst werden müssen und zum anderen auch die benötigte Einlaufzeit simuliert werden muss, bis die in der Regel nur abgeschätzten Anfangsbedingungen abgeklungen sind. Dafür erlauben Zeitschrittverfahren aber auch die Berücksichtigung sprunghaft ablaufender Vorgänge, die mit frequenzbasierten Verfahren in der Regel schwerer abzubilden sind.

### 3.3.2 Periodisch eingeschwungenes Verfahren

Besonders geeignet sind diese Methoden zur Untersuchung des Verlaufes von Raumtemperaturen unter sommerlichen Außenbedingungen, da diese sinnvollerweise als periodisch angenommen werden können. So ist die periodisch eingeschwungene Rechnung auch als das normgemäße Verfahren für Sommertauglichkeitsberechnungen erklärt worden (gemäß ÖNorm B 8110-3 [92] und EN ISO 13791 [93]).

Nicht geeignet sind die Methoden bei Fragestellungen, die mit der Forderung nach periodisch eingeschwungenen Verhältnissen nicht verträglich sind, z. B. Fragen nach Vorgängen bei mehrtägigen Aufheiz- oder Abkühlvorgängen, oder Problemstellungen, bei denen die genaue Modellierung von Schaltvorgängen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis hat, wie z. B. die Untersuchung von Regelungsvorgängen im Heiz- oder Kühlsystem oder die Frage nach der Auswirkung von Stoßlüftung (vgl. [68]).

In Abschnitt 2.7.2.2 wird die Lösung der instationären Bilanzgleichungen anhand der periodisch eingeschwungenen Methode detailliert

erklärt.

### 3.3.3 1D- versus 3D-Verfahren

Die typischen thermisch-dynamischen Gebäudesimulationsverfahren, die in diversen Simulationsprogrammen umgesetzt sind (siehe Abschnitt 4.2) werden oft als thermisch dreidimensional rechnend missverstanden, da zur Modellbeschreibung zumeist ein geometrisches 3D-Modell durch den Benutzer erstellt wird. Aus dem geometrischen 3D-Modell, das sich in der Regel aus einer Anzahl von raumbegrenzenden Hüllflächen (Bauteilflächen ohne Dicke) zusammensetzt, kann das Simulationsprogramm Informationen wie Bauteilorientierungen, -fläche, ggf. -verschattungen und bei detaillierten Verfahren Strahlungsaustausch im Raum ermitteln. Die Wärmeleitung in den Bauteilen wird aber tatsächlich nur in einer Dimension behandelt. Den eindimensionalen Simulationsverfahren liegt also die Fiktion zugrunde, dass die Gebäudehülle aus plattenförmigen, homogen geschichteten Bauteilen zusammengesetzt ist, deren thermische (Teil-)Leitwerte mittels Multiplikation von Wärmedurchgangskoeffizienten und Bauteilflächen berechnet werden können. Der Gesamtleitwert der Gebäudehülle ergibt sich durch Aufsummieren der Teil-Leitwerte. Die Fehler solcherart aufgebauter thermisch eindimensionaler Modelle der Gebäudehülle werden im Nachhinein ggf. durch das Aufsummieren von Leitwert-Zuschlägen ( $\psi$ ,  $\chi$ ) zu kompensieren versucht. Sämtlichen Bereichen der Gebäudehülle, in welchen mehrdimensionale Wärmeleitung stattfindet – neben Gebäudekanten (2D) und -ecken (3D) auch weitere typische Wärmebrückenbereiche, die sich z. B. durch inhomogene Bauteilaufbauten, Bauteildurchdringungen, etc. ergeben – wird in der thermischen Gebäudesimulation (1D) meist wenig Beachtung gewidmet.

Unter Verwendung der Leitwert-Theorie ist es jedoch möglich, den Einfluss von mehrdimensional ablaufenden Wärmeleitungsprozessen auf die Wärmespeicherung mit hoher Genauigkeit zu analysieren. Die Theorie ist mittlerweile auch in leistungsfähigen instationären Wärmebrücken-Simulationsprogrammen umgesetzt (siehe Abschnitt 4.3). Im Zuge solcher mehrdimensionalen Berechnungen können die harmonischen thermischen (Teil-)Leitwerte eines 3D-Raumes ermittelt werden.

In weiterer Folge kann anhand der auf instationäre, periodisch eingeschwungene Vorgänge verallgemeinerten Leitwert-Theorie [64] für jede Harmonische (d. h. für jeden rein sinusförmigen Zeitverlauf) die Wärmeleitungsgleichung unter Verwendung der erhaltenen harmonischen Leitwerte exakt gelöst werden [63].

Im Rahmen von Parameterstudien wurde in [72] herausgefunden,

dass die weithin übliche Modellierung der Gebäudehülle in eindimensionaler Näherung unter Verwendung von Außenabmessungen<sup>8</sup> die Wärmespeicherfähigkeit der Gebäudehülle deutlich überschätzt. Für die Betrachtung der Auswirkung täglich auftretender Temperaturschwankungen zeigt sich unter Verwendung des periodisch eingeschwungenen Berechnungsansatzes, dass die Verwendung von Innenabmessungen beim Aufbau des eindimensionalen Modells der Gebäudehülle zu einer weitaus besseren Übereinstimmung mit einem zwei- oder dreidimensionalen Berechnungsmodell führt.

Die Analyse des Wärmedurchgangs bei erdbodenberührten Bauteilen stellt auch einen Anwendungsfall dar, wo aufgrund des gewichtigen Einflusses der Wärmespeicherfähigkeit des Erdreichs eine dreidimensionale Berechnung wichtig wird. In [81] wird diese Thematik hinsichtlich mehrdimensionaler Berechnung beleuchtet und Unterschiede zu vereinfachten Verfahren aufgezeigt.

Es ist aber anzunehmen, dass die Auswirkung der Wärmebrückeneffekte bei der Berechnung des sommerlichen Wärmeschutzes bei heutigen – thermisch normgemäßen – Konstruktionen vernachlässigbar ist. Bei sehr massiven Gebäuden wird aufgrund der Flächenermittlung per Rauminnenabmessung die Speicherfähigkeit ggf. unterschätzt weshalb zu dieser Thematik noch Forschungsbedarf gegeben ist. Eine dreidimensionale thermisch dynamische Betrachtung eines Raumes führt durch die detaillierte Modellierung der 3D-Bauteil- bzw.-Raumgeometrie jedoch noch zu weitaus mehr Aufwand als die 1D-Simulation und soll deshalb nicht weiterer Fokus dieser Arbeit sein, die es zum Ziel hat ein benutzerfreundliches und mit möglichst wenig Arbeitsaufwand verbundenes Werkzeug zur Berechnung der sommerlichen Raumtemperaturen zu entwickeln.

---

<sup>8</sup>Für den Sommerfall wird nach ÖNorm B 8110-3 ohnehin mit Innenabmessungen gerechnet.

## Kapitel 4

# Programme zur Berechnung

Die in Kapitel 3 vorgestellten Methoden zur Berechnung der Sommer-tauglichkeit von Räumen sind in diversen Programmen umgesetzt worden. Wie bei den Berechnungsmethoden wird folgend wiederum in vereinfachte Verfahren und instationäre Simulationsverfahren unterschieden.

### 4.1 Vereinfachte Verfahren

#### 4.1.1 Bauphysiksoftware Österreich

Die am österreichischen Markt vertretenen Bauphysikprogramme wie z. B. Archiphysik, EcoTech, ETU, GEQ, etc. ermöglichen die normgemäße Berechnung des sommerlichen Wärmeschutzes. Dabei kann mit den Programmen ein Nachweis anhand des vereinfachten Verfahrens der ÖNorm B 8110-3 [92] über die mindesterforderliche speicherwirksame Masse durchgeführt werden. Zumeist wird auch die detaillierte Methode per Nachweis über die Berechnung des Tagesverlaufes der operativen Temperatur eines hochsommerlichen Tages angeboten. Bezüglich der detaillierten Variante konnte von den meisten Anbietern<sup>1</sup> bestätigt werden, dass die Grundlage des implementierten Verfahrens auf dem Prototyp für Bauphysiksoftware Österreich, der in Abschnitt 4.2.1 näher erläutert wird, beruht.

#### 4.1.2 PHPP

Das Passivhaus Institut (PHI) hat speziell zur energetischen Planung von Passivhäusern eine Berechnungshilfe, das Passivhaus-Projektierungspaket (PHPP) erarbeitet. Die Algorithmen greifen dabei laut PHI

---

<sup>1</sup> Archiphysik, EcoTech, GEQ

auf die aktuelle internationale Normung zurück, wobei an einigen Stellen Verallgemeinerungen oder Abweichungen (bedingt durch das extrem geringe Energiebedarfsniveau von Passivhäusern) implementiert sind. An mehreren hundert Objekten wurden Messergebnisse mit Berechnungsergebnissen des PHPP und dynamischen Simulationen verglichen, wodurch eine Anpassung und Validierung durchgeführt werden konnte. Das PHPP erlaubt bezüglich des sommerlichen Wärmeschutzes die Berechnung des Sommerkomforts (angepasst an Passivhäuser) bei rein passiver Kühlung anhand von Übertemperaturhäufigkeit ( $> 25^\circ\text{C}$ ), sowie die Sommerbilanz bei aktiver Kühlung: den jährlichen Kühlbedarf [ $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ] und die maximale Kühllast [ $\text{W}/\text{m}^2$ ].

## 4.2 Simulation 1D

In Kapitel 3.3 werden instationäre Berechnungsverfahren behandelt. In folgendem Abschnitt soll nun eine Auswahl von Simulationsprogrammen vorgestellt werden, die auf diesen Ansätzen beruhen. Die Bezeichnungen thermisch dynamische oder thermisch-energetische Gebäudesimulation (TEG) finden für diese Art der instationären Gebäudesimulation Verwendung. Aus einer relativ großen Anzahl am Markt verfügbarer dynamischer Gebäudesimulationsprogramme wie beispielsweise

- Blast
- Doe-2
- Energy Plus
- Geba
- Gebsimu
- IDA ICE
- Tas
- Trnsys
- Wufi-Plus

wurde eine kleine Auswahl getroffen, die näher vorgestellt wird: Die Programme Trnsys, Tas und Energy Plus werden als Vertreter der Simulationsprogramme, die sich des Zeitschrittverfahrens bedienen, gewählt, Geba als Simulationsprogramm des thermischen Verhaltens von Räumen, oder ganzer Gebäude im periodisch eingeschwungenen Zustand. Überdies soll anfangs ein Prototyp für die thermische Raumsimulation im Sommer vorgestellt werden, der als Vorlage für diverse österreichische Bauphysiksoftware gilt und auch auf einem Zeitschrittverfahren fundiert. Gemein ist diesen Programmen, dass sie in der Regel über relativ komplexe Programmoberflächen verfügen und neben

genauer Kenntnis des Programms selbst auch sehr gutes bauphysikalisches und oft auch tiefergehendes EDV-Wissen voraussetzen.

In den meisten Fällen sind solch detaillierte Berechnungen auch mit einem hohen Arbeitsaufwand in der Eingabe verbunden. Auch geringere Änderungen in dem architektonischen Entwurf oder der Konzeption eines Gebäudes können große Einwirkungen auf die klimatischen Bedingungen im Innenraum haben und erfordern oft erneut hohen Zeitaufwand bei der Neuberechnung. Um die Machbarkeit einer Entwurfs-idee zu prüfen steht dieser hohe Einsatz an Arbeitszeit in vielen Fällen nicht im Verhältnis zu den Ergebnissen oder betriebswirtschaftlichen Interessen (vgl. [12]). Dieser Problematik wird mit der Entwicklung einer intuitiven, fehlertoleranten Programmoberfläche, die dem Benutzer möglichst viele Eingaben automatisiert abnimmt und schnelle Ergebnisse liefert, entgegengewirkt (siehe Kapitel 6.2).

#### 4.2.1 Prototyp für Bauphysiksoftware Österreich

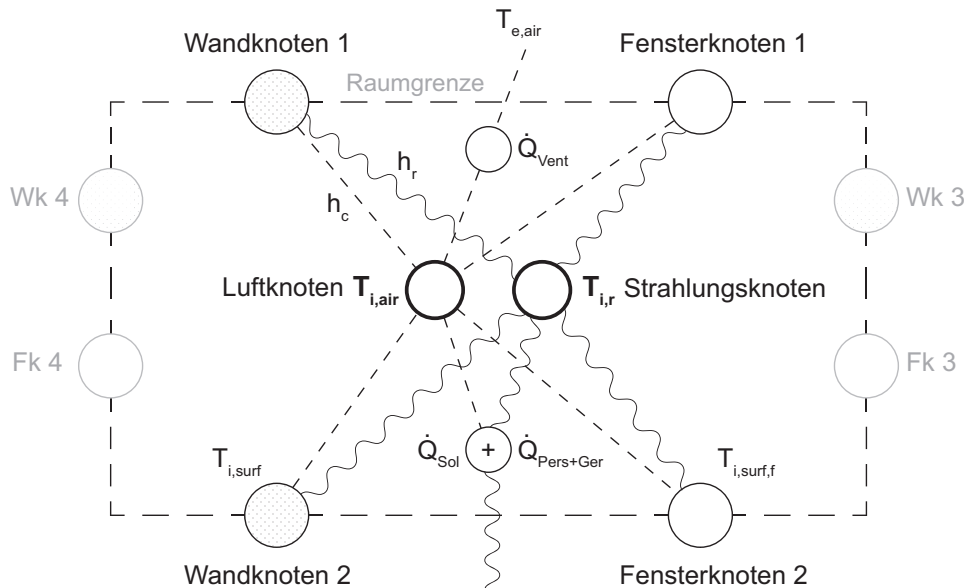
Für die Diskussion in dem ÖNorm Arbeitsgremium ON AG 175-01 wurde von Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bednar ein Software-Prototyp entwickelt [6]. Das Tool basiert auf dem Tabellenkalkulationsprogramm Excel von Microsoft. Es erlaubt die dynamische Berechnung der sommerlichen Raumtemperatur in einem quaderförmigen Raum mit den Wänden W1 (Süden), W2 (Osten), W3 (Norden), W4 (Westen), Boden, Decke und IW (Innenwand). Das Berechnungsmodell, welches nach [6] den Vorgaben der EN ISO 13791 und EN ISO 13792 entspricht, wird in [110], [6], [5] und [30] konzeptionell vorgestellt. In Abb. 4.1 wird das Rechenmodell als Netzwerk, in Abb. 4.2 sowie in Formeln 4.1, 4.2 und 4.3 wird die Berechnung effektiver Temperaturen dargestellt. „Um den Programmieraufwand minimal zu halten, wurde entsprechend EN ISO 13791 ein vereinfachtes Verfahren zur Lösung der Differentialgleichungen in Excel abgebildet“ [5]. Die Abbildung der Bauteile erfolgt dabei durch die innere und äußere wirksame Wärmekapazitäten entsprechend EN ISO 13786, der auftriebsinduzierte Luftaustausch über gekippte oder offene Fenster wird entsprechend EN ISO 13791 abgebildet. Das Verfahren wird vom Entwickler gegenüber der EN ISO 13791 als vereinfacht angesehen. Die Berechnung erfolgt in Zeitschritten.

Mithilfe der Excel-Tabellenblätter werden die relevanten Eingabeparameter eingegeben und über ein Makro (ausführbare VBA<sup>2</sup>-Befehle innerhalb von Excel) eine dynamische Berechnung der som-

---

<sup>2</sup>Visual Basic for Applications (VBA) ist eine Skriptsprache für die Steuerung von Abläufen der Microsoft-Office-Programmfamilie.





**Abbildung 4.1:**  $h$  Übergangskoeffizient;  $T_{\text{air}}$  Lufttemperatur;  $T_r$  Strahlungstemperatur;  $T_{\text{surf}}$  Oberflächentemperatur;  $\dot{Q}_{\text{Sol}}$  Wärmeintrag durch Sonne;  $\dot{Q}_{\text{Pers+Ger}}$  Wärmeintrag durch Personen und Geräte;  $\dot{Q}_{\text{Vent}}$  Wärmestrom zufolge Lüftung (vgl. [6][30]).

merlichen Raumtemperatur im untersuchten Raum durchgeführt. Die Eingangsparameter sind im Wesentlichen in folgender Liste vermerkt (vgl. [5], [6], [15]):

**Eigenschaften Bauteile.** Schichtenaufbau, Schichtendicke, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Massendichte, Flächen, Orientierung.

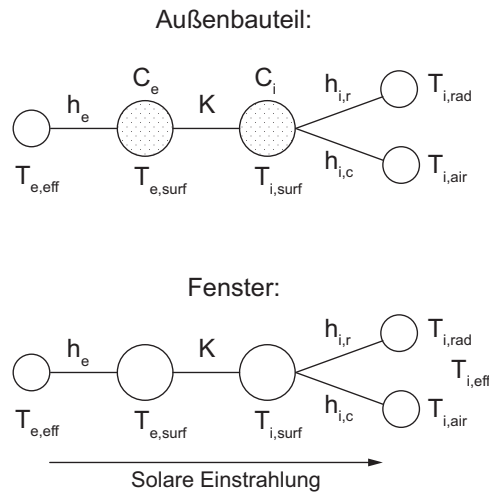
**Strahlungseigenschaften Außenbauteile.** Strahlungsabsorptionsgrad der Außenoberflächen.

**Eigenschaften Fenster.** Größe, offenbar/nicht offenbar,  $U_g$ ,  $U_f$ ,  $\Psi$ , Rahmenbreite,  $g_{\text{Vergl}}$ , sowie strahlungstechnische Eigenschaften (Transmissions- und Reflexionsgrad) und Position des Sonnenschutzes.

**Klima.** Seehöhe, Tagesmittelwert des Standortklimas, Tagesgang (innerstädtisch vs. Umland), stündliche Werte der Solarstrahlung.

**Innere Lasten.** Wärmeintrag durch Personen und Geräte in Watt (Tagesverlauf).

**Lüftung.** hygienischer Luftwechsel mit Außenluft oder über Lüftungsanlage, mögliche nächtliche Fensteröffnung (offen, 10 cm gekippt, zu), Luftwechsel der Lüftungsanlage.



**Abbildung 4.2:**  $h$  Übergangskoeffizient;  $T_{\text{eff}}$  effektive Temperatur;  $C$  Wirksame Wärmekapazität für 24h,  $T_{\text{surf}}$  Oberflächentemperatur;  $K$  Leitwert;  $h_{c,e} = 25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ,  $h_{r,e} = 5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ;  $h_{c,i} = 2,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  für horizontalen Wärmestrom;  $h_{c,i} = 1 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  für Wärmestrom abwärts;  $h_{c,i} = 5 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  für Wärmestrom aufwärts;  $h_{r,i} = 5 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  (vgl. [6][30]).

$$T_{e,eff} = T_{e,air} + \frac{1}{h_{e,c} + h_{e,r}} \cdot (q_{sol} \cdot a_{sol} + h_{e,r} \cdot (T_{e,r} - T_{e,air})) \quad (4.1)$$

$$T_{e,eff,F} = T_{e,air} + \frac{0,84 \cdot 5,6}{h_e} \cdot (T_{e,r} - T_{e,air}) \quad (4.2)$$

$$T_{i,eff,F} = T_{i,air} + \frac{h_{i,r}}{h_{i,c} + h_{i,r}} \cdot (T_{i,r} - T_{i,air}) \quad (4.3)$$

$$(4.4)$$

$T_{e,eff}$	Effektive Temperatur an Außenseite des Bauteils [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{i,eff,F}$	Effektive Temperatur an Innenseite des Fensters [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{e,air}$	Außenlufttemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{e,r}$	Strahlungstemperatur des Himmels [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{i,r}$	Strahlungstemperatur des Raumes [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$h_c$	Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ]
$h_r$	Wärmeübergangskoeffizient für Strahlung [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ]
$q_{sol}$	Solare Einstrahlung (Globalstrahlung) [ $\text{W}/(\text{m}^2)$ ]
$a_{sol}$	Absorptionskoeffizient für Solarstrahlung

Da der Prototyp als Basis einiger österreichischer Bauphysikprogramme hinsichtlich des normgemäßen, „detaillierten“ Sommertauglichkeitsnachweises dient, soll das Verfahren folgend erläutert, in Vergleichsrechnungen überprüft (siehe Abschnitt 5.1) und gegebenenfalls Problempunkte aufgezeigt werden. Als Beilage von [107] konnte das Tool mit Entwicklungsstand Juli 2013 in digitaler Form analysiert werden.

Das Berechnungsverfahren lässt sich nicht eindeutig in die periodisch eingeschwungene Methode, welche üblicherweise im Frequenzbereich agiert oder das Zeitschrittverfahren einordnen – vielmehr ist es eine Kombination aus beiden Typen. Aufbauend auf der periodischen Methodik der ÖNorm B 8110-3 werden die inneren und im Gegensatz zum vereinfachten Verfahren auch die äußeren wirksamen Wärmekapazitäten der Bauteile nach ÖNorm EN ISO 13786 berechnet. Der Berechnung liegt dabei im Gegensatz zu Geba jedoch nur eine Harmonische zugrunde (Geba 12 Harmonische, siehe auch Abschnitt 4.2.5). Die Ermittlung des Tagesverlaufs der operativen Temperaturen des untersuchten Raumes wird dann jedoch im Zeitschrittverfahren bis zu einem eingeschwungenen Zustand repetierend durchgeführt. Es wird folgend versucht die grundlegende Logik als Pseudocode wiederzugeben, aus Gründen der Übersichtlichkeit wird jedoch an dieser Stelle z. B. auf die Erläuterung der im Tool integrierten Möglichkeit einer Lüftungsanlage im Pseudocode verzichtet.

In Abschnitt 5.1 wird versucht, die Ergebnisse der Software nach der europäischen Norm ISO 13791 [93] zu validieren und gegebene Einschränkungen zu kommentieren.

```

1  /* Außentemperatur; Mittelwert NAT-T13, Schwankung öN B 8110-3 A.1 */
2  Ermittle_Te();
3
4  /* Stündliche solare Bestrahlungsstärken nach öN B 8110-3 A.2 als auch stündl.
5     effektive Außentemperatur jeder Außenbauteilfläche für jede Orientierung und
6     Neigung: TeEff nach Formeln 4.1 */
7  Ermittle_ILSol();
8  Ermittle_TeEff();
9
10 /* Stündlich festgelegte Werte int. Lasten für Personen und Geräte einlesen */
11 Ermittle_ILper_ILger();
12
13 /* Wirksame Wärmekapazitäten aller Bauteile Innen und Außen (24h Periode) */
14 Ermittle_KapBautI();
15 Ermittle_KapBautE();
16
17 /* Wirksame Wärmekapazität der Einrichtung; A_NF = Nettoraumfläche */
18 KapEinr = A_NF * 38 * 1024.8;
19
20 /* Tair = Trad = Top = alle TiSurf = alle TeSurf = 20 */
21 Initialisiere_StartTemperaturen();
22
23 /* Uebergangskoeffizienten innen Konvektion und Strahlung, außen gesamt */
24 hic = 2.5; hir = 5; he = 25;
25
26 /* Verteilungsfaktoren */
27 CFsol = 0.1; CFger = 0.5; CFper = 0.5;
28
29 /* Hauptschleife: Wiederholung bis deltaTrad < 0.0001 und deltaTair < 0.0001 */
30 WIEDERHOLE im 10s Zeitschritt bis eingeschwungener Zustand {
31
32     /* Summe der über sämtliche Fenster linear interpolierten Globalstrahlung
33        zum akt. Zeitschritt unter Berücksichtigung von (Glas-)Fläche, g-Wert
34        und entweder Sonnenschutz (Fc) oder Reduktion des Strahlungstransmis-
35        sionsgrads per Exponent Epsilon */
36     Ermittle_ILsol_akt();
37
38     /* Wärmestrom zuf. Konvektion Innere Lasten (Solar, Geräte, Personen) */
39     qILc_akt = ILsol_akt*CFsol + ILger_akt*CFger + ILper_akt*CFper;
40
41     /* Wärmestrom zuf. Strahlung Innere Lasten (Solar, Geräte, Personen) */
42     qILr_akt = ILsol_akt*(1-CFsol) + ILger_akt*(1-CFger) +
43               + ILper_akt*(1-CFper);
44
45     /* Wärmestrom zuf. Konv. innen; qBautic = hic * ABaut * (Tair-TiSurf),
46        für jedes Bauteil durchzuführen; ABaut = Bauteilfläche;
47        qBaut = Wärmestrom konvektiver Anteil über alle BT */
48     Ermittle_qBautic();
49     qBaut = -1 * (SumAll(qBautic));
50
51     /* Wärmestrom zuf. Strahlung innen; qBautir = hir*ABaut*(Trad-TiSurf),
52        für jedes Bauteil durchzuführen */
53     Ermittle_qBautir();
54

```

```

55  /* Wärmestrom zuf. Konv. und Strahlung außen; für jedes BT durchzuf.,
56     qBaute = he*ABaut * (TeEff_akt-TeSurf) oder wenn adiabat
57     qBaute = hic*ABaut * (Tair-TeSurf) + hir*ABaut * (Trad-TeSurf) */
58  Ermittle_qBaute();
59
60  /* Wärmestrom zuf. Transmission qBautk = KBaut*ABaut*(TiSurf-TeSurf),
61     für jedes Bauteil durchzuführen; KBaut = Wärmedurchgangswiderstand */
62  Ermittle_qBautk();
63
64  /* Volumenstrom nat. Lüftung nach öN B 8110-3 Anh. B; Wenn ganz geöffnet
65     Z.B. 0.7*100*fен_ B*fен_ H*Sqr(fен_ Heff)*Sqr(Abs(Tair-Te_akt))
66     Summe über alle Oeffnungen + Infiltration + notwendiger hyg. VolStr;
67     dann Wärmestrom zufolge Luftvolumenstrom ermitteln */
68  Ermittle_VolStr();
69  qVent = 0.34 * VolStr * (Te_akt - Tair);
70
71  /* Effektive Fenster Innentemperatur nach Formel 4.2 */
72  TFen_i = Tair + hir / (hir + hic) * (Trad - Tair);
73  /* Eff. Fenster Aussentemperatur nach Formel 4.3; für alle SF durchzuf.
74     TFen_e = Te_akt + 0.84 * 5.6/(he) * (SF_W * Tsky_akt +
75     + (1-SF_W) * Te_akt-Te_akt); Tsky_akt=Te_akt-10; SF_W=0.5 */
76  Ermittle_TFen_e();
77  /* Fenstertemperatur für weitere Berechnung des Wärmestroms;
78     TFen = TFen_i - (TFen_i - TFen_e) * UFen * (1/(hic + hir)),
79     für alle 4 Fensterrichtungen durchzuführen; UFen = Uw-Wert */
80  Ermittle_TFen();
81  /* Wärmestrom aufgrund Fenstertemperatur; Summe über alle Fenster */
82  qFen = SumAll(AFen * hic * (TFen - Tair));
83
84  /* Luftknotentemperatur; Lüftungsanlage weggelassen; zeitschritt = 10 */
85  Tair = Tair + (qILc_akt+qBaut+qVent+qFen) / KapEinr * zeitschritt;
86
87  /* Strahlungstemperatur, Summe über alle BT */
88  Trad = [SumAll(TiSurf * ABaut) + SumAll(TFen * AFen)+
89     + qILr_akt/hir] / ABautges;
90
91  /* Bauteilinnentemperatur für nächsten Zeitschritt berechnen (für alle BT)
92     TiSurf = TiSurf + (qBautic+qBautir-qBautk) / KapBauti * zeitschritt */
93  Ermittle_TiSurf();
94
95  /* Bauteilaussentemperatur für nächsten Zeitschritt berechnen (für alle BT)
96     TeSurf = TeSurf + (qBaute + qBautk) / KapBaute * zeitschritt */
97  Ermittle_TeSurf();
98
99  /* Operative Temperatur, Mittel aus Luft- und Strahlungstemperatur */
100 Top = 0.5 * (Tair + Trad);
101
102 } WIEDERHOLE_ENDE

```

### 4.2.2 Trnsys

Trnsys (Transient System Simulation) wurde seit der offiziellen Veröffentlichung an der Universität von Wisconsin-Madison (USA) im Jahr 1975 kontinuierlich weiterentwickelt und wird heute von einem internationalen Entwicklungsteam betreut [118] [34]. Das Programm ist in der Programmiersprache Fortran geschrieben und wurde von Anfang an mit offenem Quelltext weitergegeben.

Es ist ein dynamisch energetisches Simulationsprogramm mit modularer Struktur. Dadurch ist es möglich, komplexe Aufgabenstellungen anhand von Aufteilung in eine Reihe von Komponenten zu lösen. Die Komplexität solcher Komponenten (sogenannte „Types“) reicht dabei von relativ einfachen wie einer Pumpe, bis hin zu komplexen wie einem Mehrzonen-Gebäudemodell (Type56). Die Komponenten werden anhand einer visuellen Schnittstelle, dem Simulation Studio, ausgewählt, parametrisiert und verknüpft. Gebäudeeingabedaten werden über eine dedizierte visuelle Schnittstelle (TRNBuild) eingegeben. Mittlerweile kann mithilfe eines Google SketchUp Plugins (Trnsys3D) die Geometrieingabe in 3D erfolgen und in TRNBuild importiert werden. Das Handbuch für Type56 und TRNBuild [115] alleine umfasst 229 Seiten und zeigt damit die Komplexität der Software. Darin und wie folgend zusammengefasst, wird die Theorie des Mehrzonen-Gebäudemodells beschrieben (vgl. [50]):

Das Mehrzonen-Gebäudemodell in Trnsys ist ein Energiebilanzmodell. Ein Luftknoten repräsentiert ein komplett durchmischtes Luftvolumen mit einer gleichförmigen Temperatur. Das Luftvolumen wird durch opake und transparente Bauteile begrenzt. Die Wärmeleitung in der Gebäudehülle wird als 1-dimensionaler Vorgang angenommen, die Berechnung des Wärmetransports ist mittels Übergangsfunktionen (transfer functions) von Oberfläche zu Oberfläche implementiert. Wärmeleitung und thermische Speicherfähigkeit der Bauteile inklusive Wärmebrücken werden berücksichtigt. Die Innenflächen der Bauteile sowie konvektive Wärmeströme von verschiedenen Quellen werden an den Luftknoten gekoppelt. Eine thermische Zone kann auch aus mehreren Luftknoten bestehen. Die kurzwellige Strahlungsverteilung erfolgt über eine thermische Zone, d. h. auf allen Innenflächen aller Luftknoten einer Zone. Der langwellige Strahlungsaustausch erfolgt im detaillierten 3D Modell ebenfalls über alle Innenflächen aller Luftknoten einer Zone. Im Standardmodell ist er auf die Innenflächen eines Luftknotens

beschränkt. Neben der Energiebilanz berechnet Type56 die Feuchtebilanz des Luftknotens und ermittelt die latenten Wärmeströme in oder aus dem Luftknoten. Zusätzlich ist eine Komfortbewertung implementiert. Zur detaillierten Modellierung der Luftströmung im Gebäude steht das integrierte Modul TRNFlow zur Verfügung. Die äußeren Randbedingungen einer Zone können durch benachbarte Zonen, die Umgebung oder nutzerdefinierte Größen gegeben sein.

Bei der Simulation löst der Rechenkern alle HLK-Systemkomponenten gleichzeitig mit der Wärmebilanz des Gebäudes zu jedem Zeitschritt. Die Zeitschrittdauer kann festgelegt werden, in der Regel beträgt sie eine Stunde oder 15 Minuten.

Die Trnsys-Bibliothek umfasst neben dem multizonalen Gebäudemodell viele der in thermischen und elektrischen Energiesystemen häufig vorkommenden Komponenten: Solarthermie- und Photovoltaikanlagen, Komponenten von HLK-Anlagen, erneuerbare Energiesysteme, etc. Weitere Komponenten übernehmen das Einlesen verschiedener Klimadaten oder die Ausgabe von Simulationsergebnissen. Komponenten können zwischen Benutzern geteilt werden. Einfache Komponenten, Steuerungsstrategien oder Vor- und Nachbearbeitungsoperationen können auch direkt in der Eingabedatei mit einfachen Gleichungen anhand üblicher mathematischer und logischer Operatoren implementiert und so die Daten gewünschter Komponenten verändert werden.

### 4.2.3 Tas

Tas (Thermal Analysis Simulation Software) wurde ursprünglich von dem Cranfield Institute im Vereinigten Königreich in den 1970er und 80er Jahren entwickelt und seit 1989 von Environmental Design Solutions Limited (EDSL) ausgebaut und vertrieben [77].

Das Softwarepaket kann neben dynamischer thermischer Gebäude- und Anlagensimulation auch numerische Strömungssimulation (CFD) durchführen. Die Wärmebilanz des Gebäudes wird durch das Modul „TAS building designer“ ermittelt. HLK-Systeme und Steuerungen werden durch das Modul „TAS-Systeme“ durchgeführt. Das dritte Modul, „TAS Ambiens“, ist ein CFD-Paket (vgl. [13]). Die Theorie wird in dem Tas Theorie Handbuch [77] beschrieben, woraus folgend einige Aspekte der Modellierung kurz zusammengefasst werden:

Die Wärmeleitung in der Gebäudesubstanz wird dynamisch anhand einer von ASHRAE<sup>3</sup> abgeleiteten Methode abgebildet (Response-

---

<sup>3</sup>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

Factors). Die Konvektion an Bauteiloberflächen wird unter Verwendung einer Kombination von empirischen und theoretischen Beziehungen behandelt, wobei die konvektiven Wärmeströme abhängig von Temperaturdifferenz (Oberfläche, Luft), Bauteilorientierung (vertikal, horizontal) und im Fall externer Konvektion der Windgeschwindigkeit sind. Der langwellige Strahlungsaustausch wird nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz unter Verwendung von Oberflächenemissivitäten modelliert. Der Strahlungsaustausch im Innenraum zwischen Raumflächen wird in Tas mit dem MRT-Verfahren von Carroll modelliert, das den komplexen Strahlungsaustausch zwischen den Oberflächen eines Raumes durch Kopplung jeder Oberfläche mit einem fiktiven MRT-Knoten (mittlere Strahlungstemperatur) vereinfacht. Langwellige Strahlung von Himmel und der Erde werden anhand empirischer Zusammenhänge behandelt. Die von jedem Element des Gebäudes absorbierte, reflektierte und übertragene Solarstrahlung wird aus Strahlungsdaten der Klimadatei berechnet. Die Berechnung beinhaltet das Aufteilen der Strahlung in direkte und diffuse Komponenten und das Berechnen der Strahlungsflüsse auf jede Orientierung anhand der Sonnenposition und empirischer Modelle der Himmelsstrahlung. Wärmegewinne werden in radiative und konvektive Teile aufgelöst. Der konvektive Teil wird der Zonenluft zugeordnet, während der Strahlungsteil auf die Flächen der Zone verteilt wird. Die Infiltration, die Belüftung und die Luftbewegung zwischen den verschiedenen Zonen des Gebäudes bewirken eine Wärmeübertragung zwischen den entsprechenden Luftmassen, die durch den Massendurchsatz, die Temperaturdifferenz und die Wärmekapazität von Luft dargestellt werden. Solare Strahlung, die durch transparente Bauteile in eine Zone eindringt, fällt auf innere Oberflächen, wo sie je nach Oberflächeneigenschaften absorbiert, reflektiert oder übertragen werden kann. Es besteht die Möglichkeit für spezielle Außenbauteile aus der Geometrie berechnete Verschattungsinformationen in einer Verschattungsdatei zu speichern, die dann dafür genutzt wird, die Strahlung entsprechend auf den Oberflächen zu verteilen. Im Standardfall wird sie proportional zu ihrer projizierten Fläche in Strahlrichtung verteilt. Die Strahlung kann mehrfach in andere Zonen weitergeleitet werden (Primary, Secondary, Tertiary etc. Distribution). Tas löst die sensible Wärmebilanz für eine Zone, indem Gleichungen aufgestellt werden, die die einzelnen Energiebilanzen für die Luft und jede der umgebenden Oberflächen repräsentieren. Diese Gleichungen werden dann mit weiteren Gleichungen kombiniert, die die Energiebilanzen an den Außenflächen darstellen. Die gesamte Anzahl von Gleichungen wird für jede Stunde der Simulation gelöst, um den Verlauf von Lufttemperaturen, Oberflächentemperaturen und



Wärmeeinträgen zu erhalten.

#### 4.2.4 EnergyPlus

EnergyPlus ist ein dynamisches Gebäude-Energiesimulationsprogramm, mit welchem der Energieverbrauch für Heizung, Kühlung, Lüftung, Beleuchtung, etc. sowie der Wasserverbrauch in Gebäuden simuliert werden kann. Das Programm wird von der U.S. Regierung seit 1997 entwickelt und vereint die beiden Modelle der Programme Blast und Doe-2 in einer Simulationsumgebung. EnergyPlus ist ein konsolenbasiertes Programm, das Eingabe-Textdateien liest und auch Textdateien für die Ausgabe erzeugt. Für die ersten 17 Jahre seines Bestehens wurde EnergyPlus in der Programmiersprache Fortran entwickelt. Im Jahr 2014 wurde die erste Version veröffentlicht, die in C++ geschrieben wurde. Es ist kostenlos, Open-Source und plattformübergreifend.

EnergyPlus ist eine Sammlung von vielen Programm-Modulen, die zusammenarbeiten und basiert auf einem integralen Simulationsansatz. Dies bedeutet, dass alle drei Hauptkomponenten, Gebäude, Systeme und Anlagen, gleichzeitig gelöst werden. In Programmen mit sequentieller Simulation wie Blast oder Doe-2 werden die Gebäudezonen, die Lüftungsanlagen und die zentrale Anlagentechnik nacheinander ohne Rückkopplung von einem zum anderen simuliert.

Vorwiegend aus dem Grund, dass EnergyPlus aus zwei Vorgängerprogrammen entstanden ist, können in den einzelnen Modulen teilweise auch unterschiedliche Berechnungsmethoden ausgewählt werden. Eine Beschreibung dieser würde den Umfang sprengen, weshalb an dieser Stelle auf die sehr ausführliche Beschreibung der Theorie in der 850-seitigen „Engineering Reference“ [19] verwiesen werden soll. Die wichtigsten Eigenschaften und Fähigkeiten von EnergyPlus werden vom U.S. Department of Energy wie folgt vorgestellt [18]:

- Integrierte, simultane Lösung von thermischen Zonenbedingungen und HLK-Systemreaktionen.
- Wärmebilanzbasierte Lösung von strahlenden und konvektiven Effekten, die Oberflächentemperaturen, thermischen Komfort und Kondensationsberechnungen erzeugen.
- Frei definierbare Zeitschritte.
- Kombiniertes Wärme- und Stoffaustauschmodell, das die Luftbewegung zwischen den Zonen berücksichtigt.
- Fenstermodelle mit steuerbaren Jalousien, elektrochromen Verglasungen und schichtweisen Wärmebilanzen, die die durch Fensterscheiben absorbierte Sonnenenergie berechnen.
- Beleuchtungsstärken und Blendungsrechnungen.

- Komponentenbasierte HLK.
- Eine Vielzahl von integrierten HLK- und Lichtsteuerstrategien sowie ein erweiterbares Runtime-Scripting-System für die benutzerdefinierte Steuerung.
- Schnittstellen für Import und Export zu anderen Berechnungsprogrammen.

DesignBuilder, OpenStudio und Simergy sind eine Auswahl von Programmen, die den EnergyPlus Simulator als Rechenkern verwenden, den NutzerInnen aber eine grafische Oberfläche bieten.

#### 4.2.5 Geba

Geba ist ein thermisch dynamisches Mehrzonen-Gebäudesimulationsprogramm, das auf dem periodisch eingeschwungenen Berechnungsverfahren beruht. Es löst die Problemstellungen analytisch mittels Aufstellung und Lösung von Wärmebilanzgleichungen. Es kann dann angewendet werden, wenn die Annahme, dass Zeitverläufe mittels eines periodisch eingeschwungenen Zustandes mit einer Periode von 24 Stunden dargestellt werden können, für die Problemstellung geeignet erscheint – wie z. B. im Falle der Untersuchung des Verlaufes von Raumtemperaturen unter sommerlichen Außenbedingungen. Die in Geba verwendeten Berechnungsalgorithmen sind übersichtsmäßig in [40] dokumentiert und beruhen u. a. auf dem Konzept der Bauteilmatrizen (siehe [43]).

Da der Rechenkern Geba auch für die im Zuge der Dissertation entwickelte Programmoberfläche *Thesim3D* dient, soll etwas detaillierter darauf eingegangen werden. Die energetische Bilanzierung unter Verwendung des periodisch eingeschwungenen Ansatzes wird bereits in Abschnitt 2.7.2.2 behandelt. Die folgenden Informationen über das Programmpaket sind [68] entnommen.

##### 4.2.5.1 Historischer Abriss

Geba entstand aus einem von W. Heindl im Jahr 1968 in Zusammenarbeit mit F. Haferland entworfenen und von H. Fuchs programmierten Programmpaket zur thermischen Simulation von Gebäuden. Die Grundlagen dieses Programmpaketes sowie das Ergebnis einer mithilfe dieses Programms durchgeführten Forschungsprojekts sind in [40] publiziert. Aufgrund des in Bezug auf die Entwicklung der Informationstechnologie sehr frühen Zeitpunktes der Programmentwicklung war das Gebäudesimulationsprogramm vorerst nur auf den (damals einzig verfügbaren) Großrechnern lauffähig. Die Eingabe erfolgte über streng formatierte Lochungen von Lochkarten, erforderte sehr gewissenhaftes

Arbeiten und war aufwändig. Aus diesem Grund wurde das Programmpaket lange fast ausschließlich nur im Rahmen sehr großer Planungsprojekte und für Forschungsarbeiten eingesetzt. Die rasante Entwicklung der Informationstechnologie ermöglichte Anfang der 80er Jahre des vorigen Jahrhunderts das Programmpaket auf Personalcomputern lauffähig zu machen. Die Eingabe wurde hierbei vorerst mittels der Erstellung von formatierten Dateien im Editor bewerkstelligt. Ab dieser Zeit wurde das Programmpaket von K. Kreč kontinuierlich gewartet, laufend im Rahmen der Forschung und der Planungsbegleitung verwendet und sukzessive bezüglich seines Leistungsumfangs erweitert. Das Erstellen der Programmoberfläche GebaControl durch B. Kownatzki und S. Klyk vom Ingenieurbüro A. C. Rahn in Berlin führte schließlich Ende 1995 zu einer vergleichsmäßig einfach zu handhabenden Erstversion des Programmpaketes Geba. Die wesentlichen Konzepte und Berechnungsalgorithmen wurden seit Beginn der Programmentwicklung bis heute unverändert beibehalten. Der periodisch eingeschwungene Berechnungsansatz sowie die Beschreibung der Wärmeleitungs- und Wärmespeicherungsmechanismen über das Bauteil-Matrizenverfahren haben sich als Methoden zur planungsbegleitenden rechnerischen Simulation derart bewährt, dass sie auch in nationale und internationale Normen (ÖNorm B 8110-3 [92], EN ISO 13791 [93], EN ISO 13786 [97]) übernommen wurden.

#### 4.2.5.2 Berechnungsverfahren und Datengrundlagen

In Geba werden die periodisch eingeschwungenen Zustände durch Fourier-Reihen dargestellt. Theoretisch ermöglicht das die exakte Behandlung der auftretenden Wärmeleitungs- und Wärmespeicherungsvorgänge. Das thermische Verhalten der vorkommenden Bauteile wird durch „Bauteilmatrizen“ [43] erfasst. Diese komplexen  $2 \times 2$  Matrizen werden aus „Schichtmatrizen“, welche die wärmetechnischen Eigenschaften der einzelnen als homogen angenommenen Schichten des Bauteils charakterisieren, zusammengesetzt. Die vorliegende Version des Programmpaketes Geba V.10 unterwirft die Zeitverläufe einer Fourier-Zerlegung unter Berücksichtigung von bis zu 12 Harmonischen. Die Ungenauigkeiten, die sich aus der Beschränkung auf 12 Harmonische bei der Einführung von Zeitverläufen mit sprunghaften Änderungen, wie z. B. den Tagesgängen der Personenbelegung oder einer gegebenen Heizleistung ergeben, wirken sich auf den berechneten Temperaturverlauf im Normalfall nur wenig aus. Freilich muss aber bedacht werden, dass es nicht zielführend sein wird, mit dem Programmpaket Geba Fragestellungen, welche durch Tagesgänge mit kurzzeitigen, sehr starken Schwankungen verbunden sind – beispielsweise die Frage nach der

Auswirkung einer Stoßlüftung – behandeln zu wollen.

Bei dem von Geba angewendeten Wärmebilanz-Verfahren wird über den von Luft erfüllten Teil des Raumes bilanziert. Dabei wird das Wärmespeichervermögen der Raumluft insofern vernachlässigt, als zu jedem Zeitpunkt die Summe der dem Raum zufließenden Wärmeströme jener der abfließenden gleichgesetzt wird. Diese Vernachlässigung der Wärmespeicherfähigkeit der Raumluft ist sicher zulässig, da sie weit geringere Auswirkungen hat als die unvermeidlichen Ungenauigkeiten bei den in die Rechnung einzuführenden Materialdaten.

Bei der Erstellung der Wärmebilanz ist es nicht gleichgültig, ob man die im Raum vorhandenen Wärmequellen zur Gänze als in der Raumluft befindlich annimmt oder – zumindest zum Teil – den Bauteiloberflächen zuordnet. Dabei kommt es weniger darauf an, wie man die Verteilung auf die verschiedenen Bauteile vornimmt, als auf die der Luft und die den Bauteilen insgesamt zukommenden Anteile. Im Programmpaket Geba werden die Heizleistungen infolge Sonneneinstrahlung durch die Fenster, Personenbelegung und Beleuchtung nach fixen Schlüsseln auf Raumluft und Bauteiloberflächen und auch auf die Oberflächen der Einrichtungsgegenstände verteilt.

Der „Strahlungsaustausch“ (der raumseitigen Oberflächen untereinander und mit den Oberflächen der Einrichtungsgegenstände) wird im Programmpaket Geba nicht berücksichtigt. Bei der Berechnung von Raumlufttemperaturen und Heizleistungen bringt die Bilanzierung ohne Berücksichtigung des Strahlungsaustausches jedoch keine großen Ungenauigkeiten mit sich.

Die implizit der Bilanzierung zugrunde gelegte Voraussetzung einer völligen Durchmischung der Raumluft, also einer einheitlichen Raumlufttemperatur zu jedem Zeitpunkt, ist sicher nie exakt erfüllt. Die sich tatsächlich im Raum einstellende Temperaturverteilung kann von einer Vielzahl von Einflüssen abhängen, wie z. B. vom verwendeten Heizungssystem, von den Lüftungsbedingungen usw. In Geba wird die vereinfachende Voraussetzung völlig durchmischter Raumluft verwendet.

Die für die Rechnung relevanten Einflüsse auf die Außenseite der Gebäudehülle, also der Einfluss der Außenlufttemperatur, der Bestrahlung durch die Sonne und des langwelligen Strahlungsaustausches mit Umgebung und Atmosphäre, werden durch die sogenannte „Strahlungslufttemperatur“ (siehe [57]) abgebildet.

Die Beschränkung auf eindimensionale Wärmeleitungsvorgänge bringt es mit sich, dass der eigentliche Baukörper näherungsweise durch die Angabe plattenförmiger, geschichteter Bauteile beschrieben wird. Jede Schicht eines solchen Bauteils wird nochmals insofern idealisiert, als Homogenität vorausgesetzt wird, zudem wird davon ausgegangen,

dass sich alle auftretenden Materialien bezüglich der Wärmeleitung isotrop verhalten.

Die optischen Eigenschaften von Verglasungen werden durch den Durchlassgrad, Reflexionsgrad, Absorptionsgrad außen, Absorptionsgrad Mitte, Absorptionsgrad innen und Exponent, die thermischen durch den thermischen Leitwert, durch  $U_g$ -Wert und entsprechende Fläche ermittelt.

Im Vergleich zu Programmen, die im Zeitbereich arbeiten, hat das Programmpaket Geba den Vorteil, dass die Zeitverläufe für jeweils nur einen Tag erhoben und eingegeben werden müssen. Zur Festlegung des Verlaufes der Außenlufttemperatur ist es aufgrund Standardisierung nur noch notwendig, den anzunehmenden Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur und die Tagesschwankung anzugeben. Der benötigte Tagesgang wird aufgrund dieser Werte konstruiert, wobei das Aussehen des Tagesganges von weiteren, allgemein gehaltenen Angaben zur Jahreszeit und zum Grad der Bewölkung wie auch vom angenommenen Datum abhängt. Bezüglich der Sonnenstrahlung reduziert sich der Eingabeaufwand auf die Angabe des Gebäudestandortes und zweier Trübungsfaktoren, welche den Zustand der Atmosphäre für die Zwecke der Berechnung von Bestrahlungsstärken (siehe [44]) beschreiben. Geba errechnet aus diesen Angaben und dem ebenso spezifizierten Datum die benötigten Bestrahlungsstärken von direkter und diffuser Sonneneinstrahlung, welche an den Außenseiten der Außenbauteile auftreten, abhängig von der jeweiligen Orientierung der Bauteile.

### 4.3 Simulation 3D

Wie bereits in Abschnitt 3.3.3 angesprochen, werden thermisch dynamische Gebäudesimulationsprogramme (Abschnitt 4.2) oft als thermisch dreidimensional rechnend missverstanden – die Wärmeleitung in den Bauteilen wird aber nur in einer Dimension behandelt.

Die Instationär-Version des 3D-Wärmebrücken-Programms AnTherm [60] zum Beispiel bietet hingegen die Möglichkeit, die Wärmeleitung und -speicherung mehrdimensional<sup>4</sup> zu berechnen. Das Programmpaket Thesim<sup>5</sup> wurde nach den in [64] beschriebenen, auf die Leitwert-Theorie aufbauenden Simulationsalgorithmen entwickelt. Durch AnTherm können die harmonischen thermischen (Teil-)Leitwerte eines 3D-Raumes ermittelt werden. In weiterer Folge kann Thesim

---

<sup>4</sup>Im Prinzip kann man von 4D sprechen, da zu den drei Raumkoordinaten die vierte Dimension des zeitlichen Verlaufes hinzukommt.

<sup>5</sup>Nicht zu verwechseln mit der im Zuge dieser Arbeit entwickelten Simulationsoberfläche *Thesim3D*.

anhand der auf instationäre, periodisch eingeschwungene Vorgänge verallgemeinerten Leitwert-Theorie für jede Harmonische (d. h. für jeden rein sinusförmigen Zeitverlauf) die Wärmeleitungsgleichung unter Verwendung der erhaltenen harmonischen Leitwerte exakt lösen [63]. Für den Spezialfall des Wärmedurchgangs durch den Erdboden wurde Thesim mit einer Benutzeroberfläche kombiniert, die zwar die vielfältigen Möglichkeiten des Simulationsprogramms nur eingeschränkt nutzt, die Handhabung für den Benutzer damit jedoch sehr einfach werden lässt. Auf diese Weise wird erreicht, dass selbst dreidimensionale, instationäre Simulationen ohne großen Aufwand und ohne weitreichendes Spezialwissen möglich werden (vgl. [81]).



## Kapitel 5

# Validierung – Berechnungsergebnisse im Vergleich

Die ÖNorm EN ISO 13791:2012 [93] (siehe Abschnitt 3.1.4) bietet ein Validierungsverfahren zur Berechnung der sommerlichen Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik, wobei anfangs verschiedene Wärmeübertragungsvorgänge und in späterer Folge auch das gesamte Berechnungsverfahren überprüft werden können. Zur Validierung des gesamten Berechnungsverfahrens gibt die Norm zwei fiktive Räume vor, die auch an dieser Stelle als Referenzräume zum Vergleich der Ergebnisse der ausgewählten Berechnungsarten und Programme dienen sollen.

Bei der gesamten Modellvalidierung wird die Berechnung der operativen Temperatur unter periodischen Bedingungen für verschiedene Fälle betrachtet: zwei unterschiedliche Raumgeometrien A und B mit jeweils 9 Prüffällen, wobei Bauteilaufbauten, Randbedingungen, Lüftungsverhalten und Standort variieren. Genauer stellen die 18 verschiedenen Prüffälle zwei quaderförmige Räume mit unterschiedlich großer, westorientierter Verglasung ( $3,5 \text{ m}^2$  vs.  $7 \text{ m}^2$ ), unterschiedlichen Verglasungstypen (Einfach- vs. Zweifachverglasung), unterschiedlicher thermischer Masse (leicht vs. schwer), wechselnder oberer horizontaler Raumbegrenzung (Innendecke vs. Flachdach), unterschiedlichem Lüftungsverhalten (fix niedrig vs. Nachtlüftung vs. fix hoch), vorgegebenen internen Lasten<sup>1</sup> und unterschiedlichem Breitengrad ( $40^\circ\text{N}$  vs.  $52^\circ\text{N}$ ) dar. Sofern das Simulationsergebnis von den Normergebnissen nicht mehr als  $\pm 0,5 \text{ K}$  abweicht, gilt der Prüffall als validiert. Alle 18 Prüffälle müssen für eine gültige Gesamtvalidierung dieser Anforderung entspre-

---

<sup>1</sup> 50 % konvektiv und 50 % radiativ aufgeteilt.



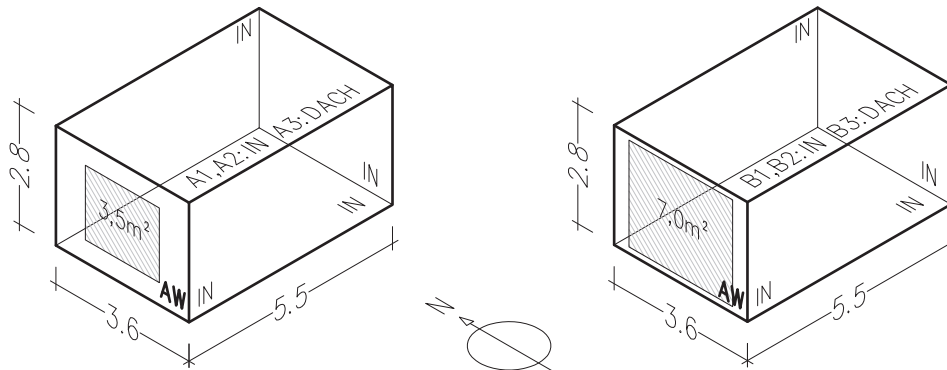
chen. Für jede Prüfung sind folgende, unter periodischen Bedingungen bestimmte Daten zu berechnen [93]:

- täglicher Maximalwert der operativen Temperatur,  $\Theta_{op,max}$ ;
- täglicher Mittelwert der operativen Temperatur,  $\Theta_{op,av}$ ;
- täglicher Mindestwert der operativen Temperatur,  $\Theta_{op,min}$ .

Bezüglich der Berechnung gelten laut [93] die Annahmen, dass:

- die Lufttemperatur im gesamten Raum gleichförmig ist;
- die verschiedenen Oberflächen der Raumelemente isotherm sind;
- die thermophysikalischen Eigenschaften der die Raumelemente bildenden Baustoffe zeitunabhängig sind;
- die Wärmeleitung durch die Raumelemente (mit Ausnahme der in das Erdreich) als eindimensional angenommen wird;
- die Wärmeleitung in das Erdreich durch die Raumelemente auf der Grundlage eines äquivalenten eindimensionalen Wärmestroms nach ISO 13370 betrachtet wird;
- die Auswirkungen von Wärmebrücken im Allgemeinen vernachlässigt werden; im Falle der Beachtung wird ihr Beitrag zur Wärmespeicherung der Wärmebrücken vernachlässigt;
- Lufträume als Luftschichten behandelt werden, die durch zwei isotherme und parallele Oberflächen begrenzt sind;
- die Konvektionswärmeübergangskoeffizienten an Außenflächen von der Windgeschwindigkeit und -richtung, an Innenflächen von der Richtung des Wärmestroms abhängen;
- der Wärmestrom durch langwellige Strahlung an den Außenflächen der Raumelemente mit einem zeitunabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten im Zusammenhang steht;
- die äußere Strahlungsumgebung (mit Ausnahme des Himmels) bei der äußeren Lufttemperatur liegt;
- die Verteilung der Sonnenstrahlung innerhalb des Raumes zeitunabhängig ist;
- die Maße jedes Elements innerhalb des Raumes gemessen werden;
- die mittlere Strahlungstemperatur durch Gewichtung der verschiedenen Innenflächentemperaturen entsprechend den jeweiligen Bereichen berechnet wird;
- die operative Temperatur der Mittelwert zwischen der Innenlufttemperatur und der mittleren Oberflächentemperatur ist.

Der Schichtaufbau aller opaken Bauteile mit entsprechenden thermophysikalischen Parametern, Eigenschaften der Verglasungen, Sonnenparameter, Randbedingungen, innere Wärmequellen und Lüftungs-



**Abbildung 5.1:** Geometrie A und Geometrie B der zwei Referenzräume. In Prüffall A1 und A2, sowie B1 und B2 sind die Decken Innenbauteile, in den Prüffällen A3 und B3 sind es Dächer und somit Außenbauteile.

vorgaben können der Norm [93] oder dem Anhang C entnommen werden. Die Geometrien der beiden Referenzräume sind in Abbildung 5.1 gemäß EN ISO 13791 dargestellt.

Folgend wird die Validierung für vier ausgewählte Simulationsprogramme nach der derzeit aktuellsten Normausgabe EN ISO 13791:2012 präsentiert. Die derzeit aktuelle ÖNorm B 8110-3:2012 verweist – wie in Abschnitt 3.1.1 beschrieben – zwar noch auf die veraltete Version ISO 13791:2004, im Sinne einer zeitgemäßen Analyse wird an dieser Stelle jedoch die ÖNorm EN ISO 13791:2012 herangezogen.

Als österreichische Entwicklungen werden die beiden ersten Programme, der Prototyp für Bauphysikprogrammsoftware (siehe 4.2.1) als Zeitschrittverfahren und das thermisch dynamische Simulationsprogramm Geba mit dem periodisch eingeschwungenen Berechnungsverfahren detaillierter analysiert und dem Validierungsverfahren unterzogen. In ersterem werden exemplarisch die operativen Temperaturverläufe der einzelnen Prüffälle dargestellt, in den weiteren wird eine Übersicht anhand der Maximal-, Durchschnitts- und Minimaltemperatur abgebildet. Die Differenzen zwischen den Norm-Ergebnissen und jenen der Programme wurden nach dem Prinzip  $\theta_{Programm} - \theta_{Norm}$  in den Diagrammen dargestellt (z. B. Abb. 5.3 und 5.4). Die Ergebnisse der Prüffälle laut Norm sind in Tabelle 5.1 abgebildet.

Die Validierungsergebnisse der weiteren bekannten Simulationsprogramme Tas und Trnsys wurden von den Herstellern zur Verfügung gestellt. Die Resultate der Validierung nach der EN ISO 13791:2012 sind für Tas bereits öffentlich verfügbar. Transsolar führte nach Urgenz eine Validierung von Trnsys nach der aktuellen Ausgabe durch und stellte den Validierungsbericht [49] für diese Arbeit zur Verfügung.

**Tabelle 5.1:** Validierungsergebnisse EN ISO 13791:2012 (A1.a - B3.c).

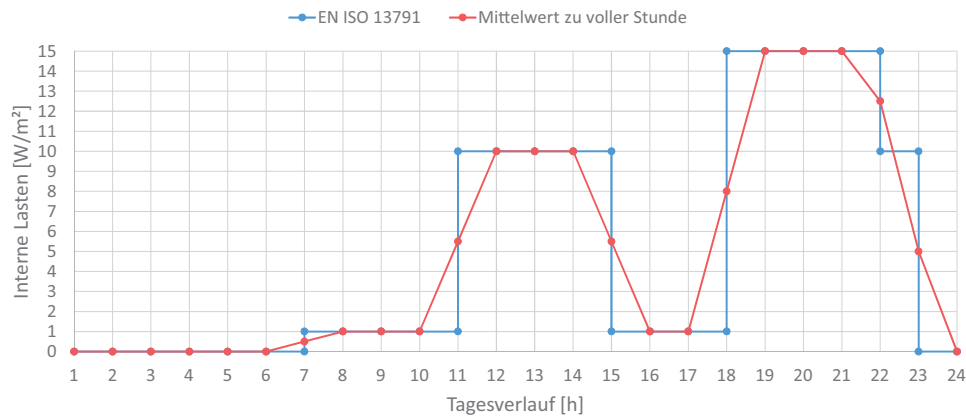
Prüfung	Lüftung	$\theta_{op,max}$ [°C]	$\theta_{op,av}$ [°C]	$\theta_{op,min}$ [°C]
A1	a	40,0	37,2	34,8
	b	33,6	29,5	25,5
	c	33,8	29,3	25,6
A2	a	38,8	37,2	35,6
	b	32,8	30,0	26,8
	c	32,6	29,4	26,6
A3	a	41,7	39,7	37,9
	b	35,7	32,0	28,1
	c	34,0	30,5	27,5
B1	a	35,8	30,5	27,1
	b	29,9	22,1	16,4
	c	28,1	21,5	16,2
B2	a	33,7	30,8	28,5
	b	26,7	22,2	17,9
	c	26,4	21,7	17,7
B3	a	36,0	32,7	30,3
	b	29,6	24,2	19,2
	c	27,7	22,7	18,6

## 5.1 Prototyp für Bauphysiksoftware Österreich

Das Tool dient als Vorlage einiger österreichischer Bauphysikprogramme hinsichtlich des normgemäßen, „detaillierten“ Sommertauglichkeitsnachweises. Diesbezüglich wurden Ende des Jahres 2011 und Anfang 2012 die Ergebnisse der von den Softwareherstellern aus dieser Vorlage übernommenen Algorithmen mit jenen des Excel-Tools abgeglichen.

Wie in Abschnitt 4.2.1 erläutert, ist das implementierte Verfahren gegenüber EN ISO 13791 vereinfacht, womit es nicht nach EN ISO 13791 validiert sein muss. Trotzdem soll an dieser Stelle die Validierung des Tools selbst anhand des Validierungsverfahrens für das gesamte Berechnungsverfahren mit den Prüffällen A1.a - B3.c der ÖNorm EN ISO 13791:2012 durchgeführt werden.

Tabelle 5.2 zeigt Validierungsparameter des Rechenmodells nach Vorgabe der Norm mit gegenübergestellter Erklärung der Abbildung im Excel-Tool, ggf. inklusive Beschreibung von Abweichungen oder nicht möglicher Abbildung. Außentemperatur- und Solarstrahlungsdaten sind in der Norm durch Werte zu jeder vollen Stunde des Tages



**Abbildung 5.2:** Interpolation der Werte zur vollen Stunde zu Stundenmittelwerten.

angegeben, so wie es das Tool als Eingabe benötigt. Interne Lasten und Luftwechsel hingegen sind in stündlichen Zeitbereichen (0-1 h, 1-2 h, etc.) angegeben. Diese Werte wurden dementsprechend auf Werte zu vollen Stunden umgerechnet, wie in Abbildung 5.2 exemplarisch für die internen Lasten dargestellt. Analog dazu wurden die Ergebnisse der Simulation wieder umgerechnet, da die zu vergleichenden Werte in der Norm inkonsistenter Weise auch als Stundenmittelwerte angegeben sind.

Die Version des Entwicklungsstandes Juli 2013 als Beilage von [107] weist eine Ungereimtheit beim Durchlauf der Zeitschritte auf, was sich z. B. in einer zeitlichen Verschiebung des Außentemperaturverlaufs und des Verlaufs der internen Lasten und des Luftvolumenstroms äußert und damit weiter von dem Validierungsergebnis der Norm abweicht. Zudem wird der Sichtfaktor in der 2013er Version im Quellcode nicht für die Glasflächen angewendet (SF ist immer 0), sondern nur für die opaken Bauteile. Aus diesem Grund wurde eine Version mit dem Entwicklungsstand Februar 2014 für die Validierungszwecke herangezogen.

**Tabelle 5.2:** Abbildung der Validierungsparameter der ÖNorm EN ISO 13791 für Prüffälle A1 bis B3 im Excel-Tool.

ÖNorm EN ISO 13791:2012	Prototyp BPH-Software Excel
Thermophysikalische Eigenschaften (ÖNorm Tab. 14) opaker Wände	✓ Schichten der Bauteilaufbauten können durch Dicke $d$ , Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ , Rohdichte $\rho$ und spezifische Wärmekapazität $c$ lt. Norm abgebildet werden

Modellgeometrie (ÖNorm Tab. 13, ÖNorm Bild 11)	✓ Die geometrischen Merkmale des Prüfraumes können lt. Norm abgebildet werden
Spezifische Wärmekapazität der Luft 1008 J/(kgK); Luftdichte 1,139 kg/m <sup>3</sup>	~ Die volumenbezogene Wärmespeicherfähigkeit von Luft ist im Quellcode mit 0,34 festgelegt und wird daher mit $c_{p,L} \times \rho_L = 0,31892 \text{ Wh}/(\text{m}^3\text{K})$ ersetzt
Solare Kenngrößen der Glasscheiben des Verglasungssystems und die des außenliegenden Sonnenschutzes (ÖNorm Tab. 15, Bild 13): $R_{se} = 0,074 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ , $R_{cav} = 0,08 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ , $R_{si} = 0,125 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ . Wärmedurchlasswiderstand Fensterscheibenglas = $0 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ ; Scheibe: $\tau_n = 0,84$ ; $\rho_n = 0,08$ ; Sonnenschutz: $\tau_n = 0,2$ ; $\rho_n = 0,5$ ; Wärmeübergangskoeffizienten siehe Tabellenzeile Randbedingungen. Abhängigkeit des Strahlungstransmissionsgrads vom Einfallwinkel der Sonne soll nicht berücksichtigt werden; es ist immer mit senkrechtem Strahlungseinfall zu rechnen.	~ Wärmedurchlasswiderstand des Hohlraumes $R_{cav}$ kann nicht angegeben werden, so wird ein $U_w$ -Wert der Verglasung von $1/(R_{se}+R_{cav}+R_{si}) = 3,584 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ für Geometrie A und für Geometrie B $1/(R_{se}+R_{ec}+R_{ic}+R_{si}) = 2,212 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ festgelegt. Der g-Wert wird für die Einscheibenverglasung nach Formeln 5.1, 5.2, 5.3 [91] ermittelt: 0,87. Für die Zweischeibenverglasung wird es anhand eines Tools berechnet: 0,763. Der außenliegende Sonnenschutz kann über $\tau_n$ und $\rho_n$ im Tool angegeben werden. Bei aktivem Sonnenschutz wird der Exponent im Excel-Tool nicht mehr berücksichtigt. Das passt für die Validierungsbeispiele.
Sonnenparameter:	
Strahlungszuordnungsfaktor Luft $f_{sa} = 0,10$	✓ Ist im Quellcode als Fixwert festgelegt.
Solarer Verlustfaktor $f_{sl} = 0,00$	✓ Im Tool nicht berücksichtigt, demnach für Validierung passend.
Solare Verteilungsfaktoren: Fußboden $f_d = 0,5$ Decke $f_d = 0,1$ gesamte vertikale Wände (außer Fenster) $f_d = 0,4$	✗ Solare Verteilungsfaktoren sind in dem Tool nicht berücksichtigt. Die solaren Wärmegewinne werden auf alle inneren Oberflächen gleichmäßig verteilt.

Solarer Absorptionsgrad aller Wandflächen $a_{sr} = 0,6$	✓ Kann im Tool angegeben werden.
Solarer Absorptionsgrad des Daches $a_{sr} = 0,9$	✓ Kann im Tool angegeben werden.
Randbedingungen:	
Äußerer Konvektionswärmeübergangskoeffizient $h_{c,e} = 8,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	~ Im Quellcode Wärmeübergangskoeffizient nur gesamt ( $h_{c,e} + h_{r,e} = 25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) angegeben. Für Validierung auf $h_e = 8 + 5,5 = 13,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ geändert.
Innerer Konvektionswärmeübergangskoeffizient: $h_{c,i} = 2,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (Wärmestrom horizontal)	✓ Im Quellcode äquivalent
$h_{c,i} = 5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (Wärmestrom aufwärts)	✓ Im Quellcode äquivalent
$h_{c,i} = 0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (Wärmestrom abwärts)	✓ Im Quellcode äquivalent
Strahlungswärmeübergangskoeffizient $h_{r,e} = 5,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (alle Oberflächen). (Gültig für $\varepsilon = 0,93$ und $T_{mr} = 303 \text{ K}$ )	~ Im Quellcode mit $h_{r,i} = 5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ festgelegt, Änderung für Validierung auf $5,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Klimadaten:	
Sonnenstrahlung: Die Komponenten der Sonnenstrahlung (direkt, diffus, reflektiert) sind in Stundenwerten in ÖNorm Tab. 16 und 17 jeweils für die Horizontal- und vertikale Westfläche angegeben	~ Das Tool berechnet die benötigten Strahlungsdaten nach Vorgabe der ÖNorm B 8110-3 anhand tabellarisch stündlich vorgegebenem Einheitsvektor zur Sonne am 15. Juli, Normalstrahlungsintensität ( $1322,4 \text{ W}/\text{m}^2$ ), Linkschen Trübungsfaktor (4,5), Reitzschen Trübungsfaktor (0,333), Albedo (0,2), projektspezifischer Seehöhe sowie Azimut und Neigung der jeweiligen Fläche. Für die Validierung werden die Berechnungsergebnisse mit den vorgegebenen Fixwerten überschrieben.

<p>Außenlufttemperatur: Die Außentemperatur ist in Stundenwerten in ÖNorm Tab. 18 und 19 angegeben</p>	<p>~ Das Tool berechnet die stündlichen Werte aus der anzugebenden NAT-T13 und von dieser als Durchschnitt ausgehend stündlich vorgegebenen Abweichungswerten um die Schwankung darzustellen. Das Tool unterscheidet Schwankungen abhängig von der Lage: Umland (Vorgaben nach ÖNorm B 8110-3) oder städtisches Gebiet (geringere Schwankung). Für die Validierung werden diese Werte mit den Validierungs-Fixwerten ersetzt.</p>
<p>Innere Energiequellen sind in ÖNorm Tab. 20 und in Bild 18 in stündlichen <math>[\text{W}/\text{m}^2]</math>-Werten angegeben. Wärmestromaufteilung zu je 50 % durch Konvektion und Strahlung</p>	<p>✓ Die Vorgabewerte werden im Tool eingegeben. Im Quellcode ist die 50 % Aufteilung ersichtlich.</p>
<p>Lüftung: 3 verschiedene Lüftungsmuster a, b und c werden in stündlichen Werten in der ÖNorm Tab. 21 vorgegeben</p>	<p>✓ Die Luftvolumenströme pro Stunde werden mit den Vorgabewerten der Norm überschrieben.</p>
<p>Keine Angabe zur Wärmespeicherkapazität der Einrichtung, weshalb anzunehmen ist, dass die Prüfräume ohne Einrichtung sind (Dieser Punkt ist wegen dem Unterschied zum Tool angeführt – siehe rechts.)</p>	<p>✗ Nach der Berechnungsmethode des Tools kann die Luftknotentemperatur ohne Wärmespeicherkapazität der Einrichtung nicht ermittelt werden. Es wird automatisiert mit einer Wärmekapazität der Einrichtung von <math>38,94 \text{ kJ}/\text{K}</math> pro <math>\text{m}^2</math> Nettobodenfläche im Quellcode fixiert gerechnet. Die Umrechnung der speicherwirksamen Masse von <math>38 \text{ kg}</math> in wirksame Wärmespeicherkapazität wird abweichend von der Norm durch Multiplikation mit <math>c_0 = 1024,8</math> statt <math>1046,7 \text{ J}/(\text{kgK})</math> ermittelt. Siehe Pseudocode Zeile 85.</p>

Keine Angabe zu Himmels- temperatur und Sichtfaktor zum Himmel: $T_{\text{sky}} = ? \text{ }^\circ\text{C}$ ; $F_r$ $= ?$	~ Obwohl in der Norm diesbezüglich nichts vermerkt wird, wird beim Validie- rungsbeispiel der langwellige Strahlungs- austausch an der äußeren Oberfläche der Außenbauteile offensichtlich vernachlässigt (vgl. Validierung Geba, Trnsys, Tas). Die Strahlungstemperatur ist im Quellcode mit $T_{\text{sky}} = T_{\text{e,air}} - 10 \text{ K}$ festgelegt, der Sichtfaktor ist beliebig in der Oberfläche eintragbar. Um den langwelligen Strah- lungsaustausch möglichst zu unterbinden wird folgende Anpassung vorgenommen: der vorgegebene Standardwert des Sicht- faktors (SFH) 0,5 für Außenwände und 1 für Dächer wird mit 0 ersetzt. Die Him- melstemperatur wird für die Validierung immer gleich der $T_{\text{e,akt}}$ gesetzt bzw. die Dif- ferenz zwischen Himmelstemperatur und Umgebung ( $T_{\text{DiffHU}}$ ) gleich 0. Die fiktiven Außentemperaturen, mit folgenden For- meln angegeben, sollten dann die langwel- lige Strahlung mit Umgebung und Him- mel vernachlässigen: $T_{\text{effOpak}_e} = T_{\text{e,akt}} +$ $1/13,5 \times (5,5 \times ((\text{SFH} \times \bar{T}_{\text{DiffHU}} + (1-$ $\text{SFH}) \times T_{\text{e,akt}}) - T_{\text{e,akt}}) + \text{GlobStr} \times \text{Ab-}$ $\text{sorptsK})$ und $T_{\text{effFenster}_e} = T_{\text{e,akt}} + 0.84 \times$ $5.6 / (\text{ae}) \times (\text{SFH} \times \bar{T}_{\text{sky}_\text{akt}} + (1 - \text{SFH})$ $\times T_{\text{e,akt}} - T_{\text{e,akt}})$ . Der Fehler des Ansatzes, dass $T_{\text{effFenster}_e} = T_{\text{e,akt}}$ sollte nicht so groß sein. Warum die effektiven Tempera- turen bei opaken und transparenten Bau- teilen anders angesetzt werden, ist nicht verständlich.
--	--

$$g = \tau_e + q_i \quad (5.1)$$

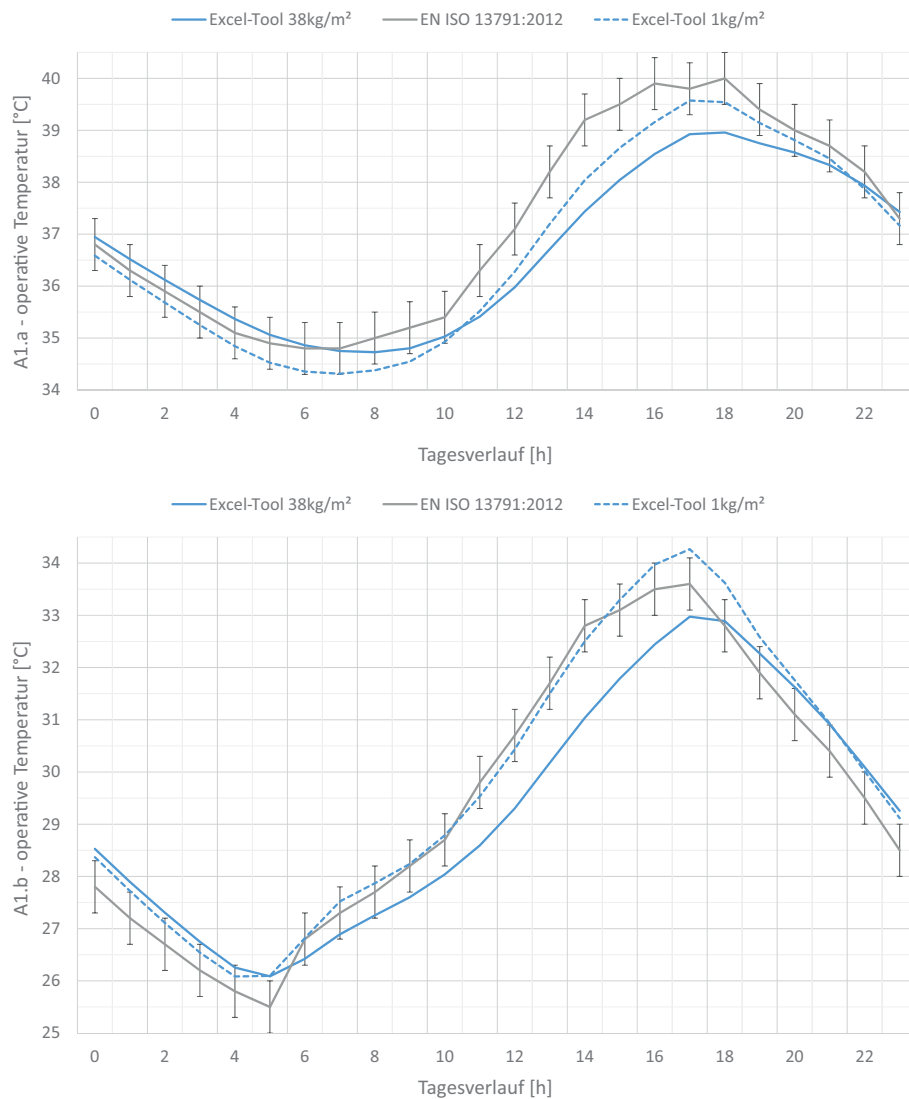
$$1 = \tau_e + \rho_e + a_e \quad (5.2)$$

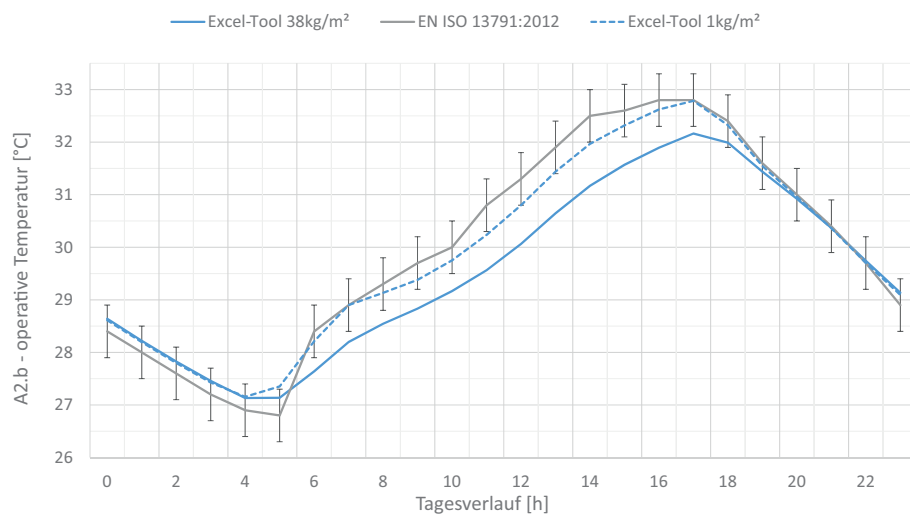
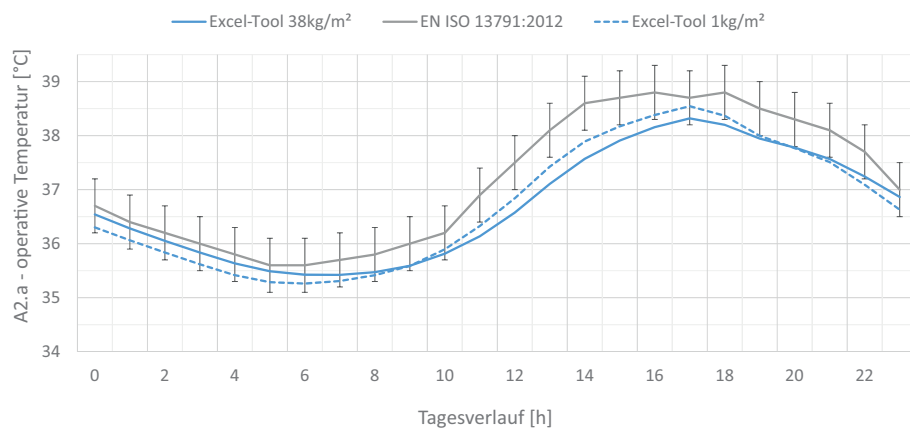
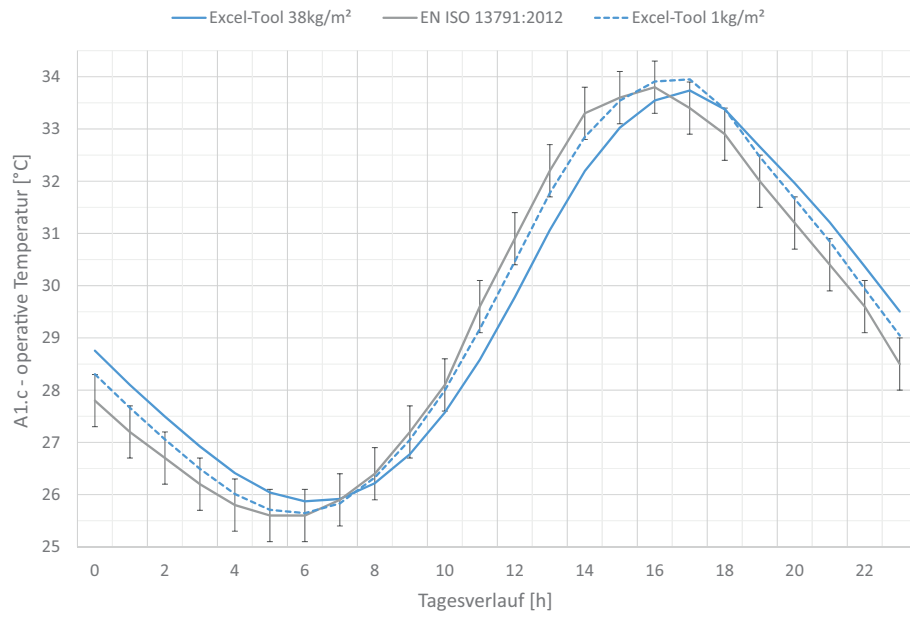
$$q_i = a_e \cdot \frac{h_i}{h_e + h_i} \quad (5.3)$$

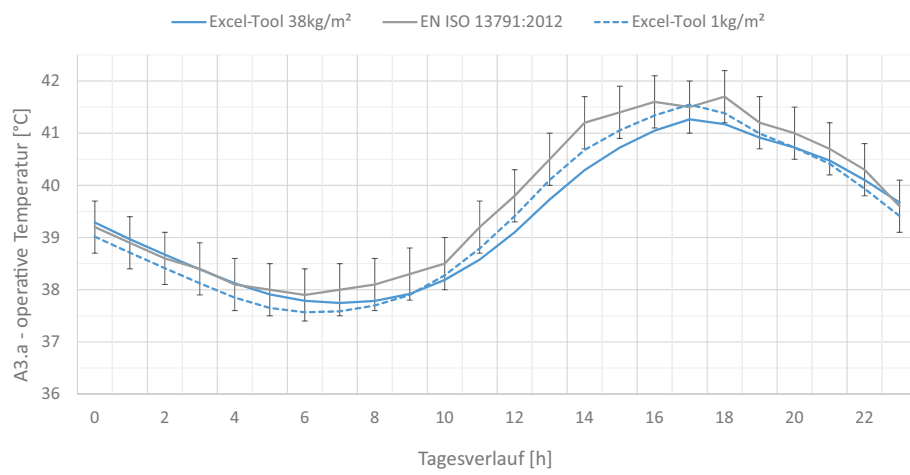
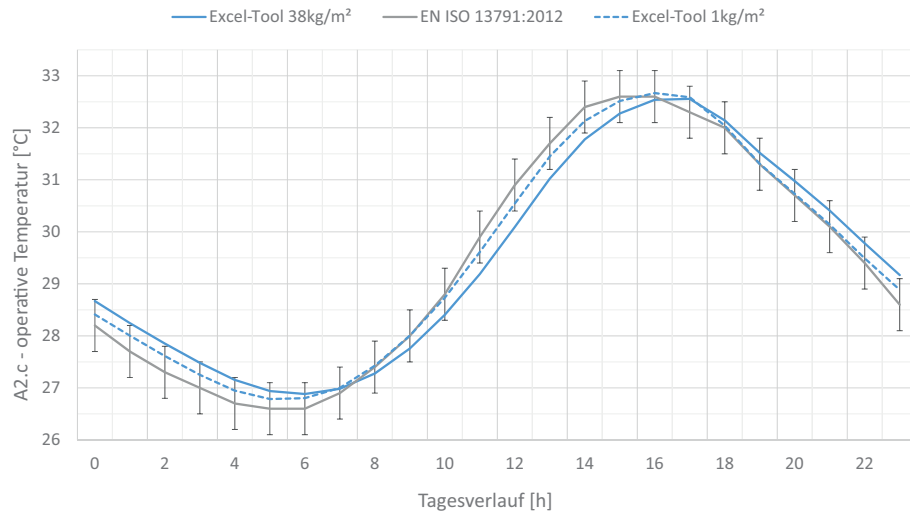
Die Ergebnisse der Validierung für die Prüffälle A1.a bis B3.c sind

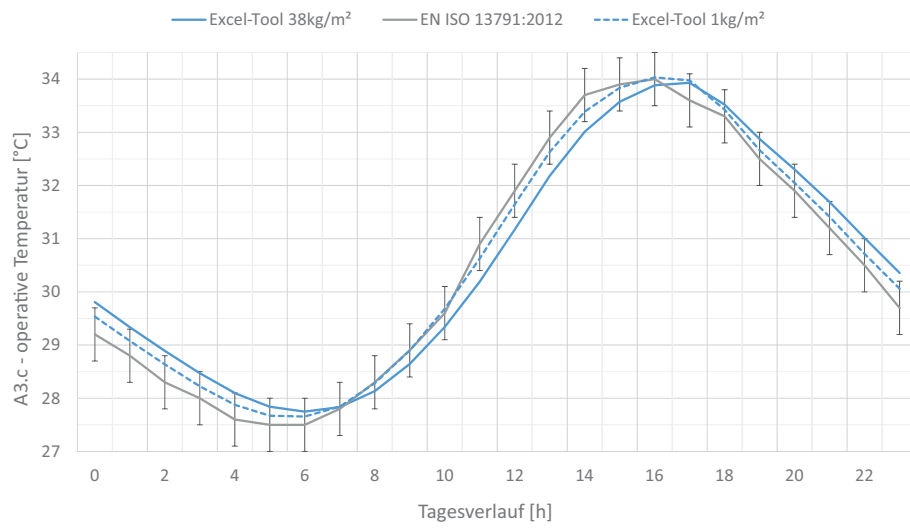
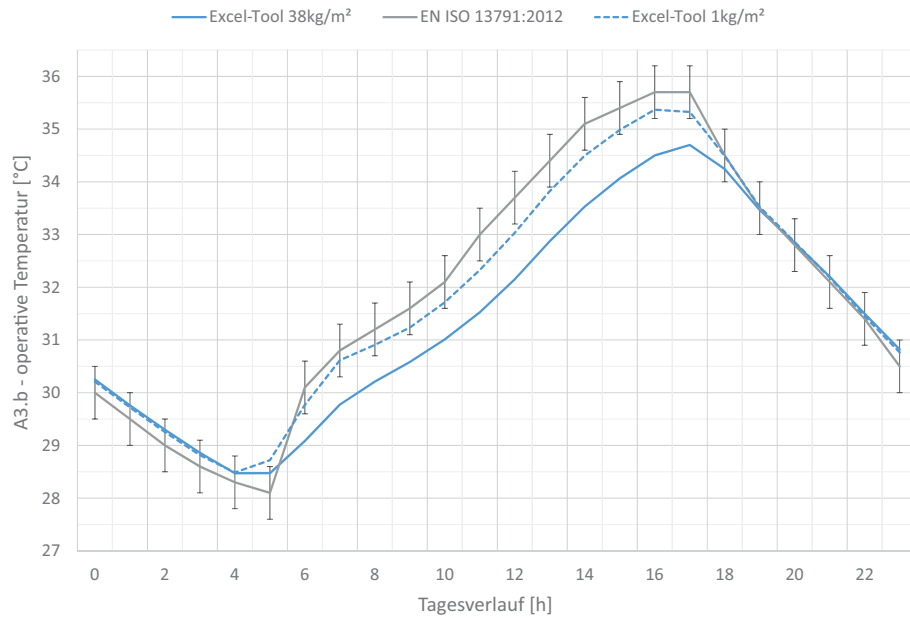


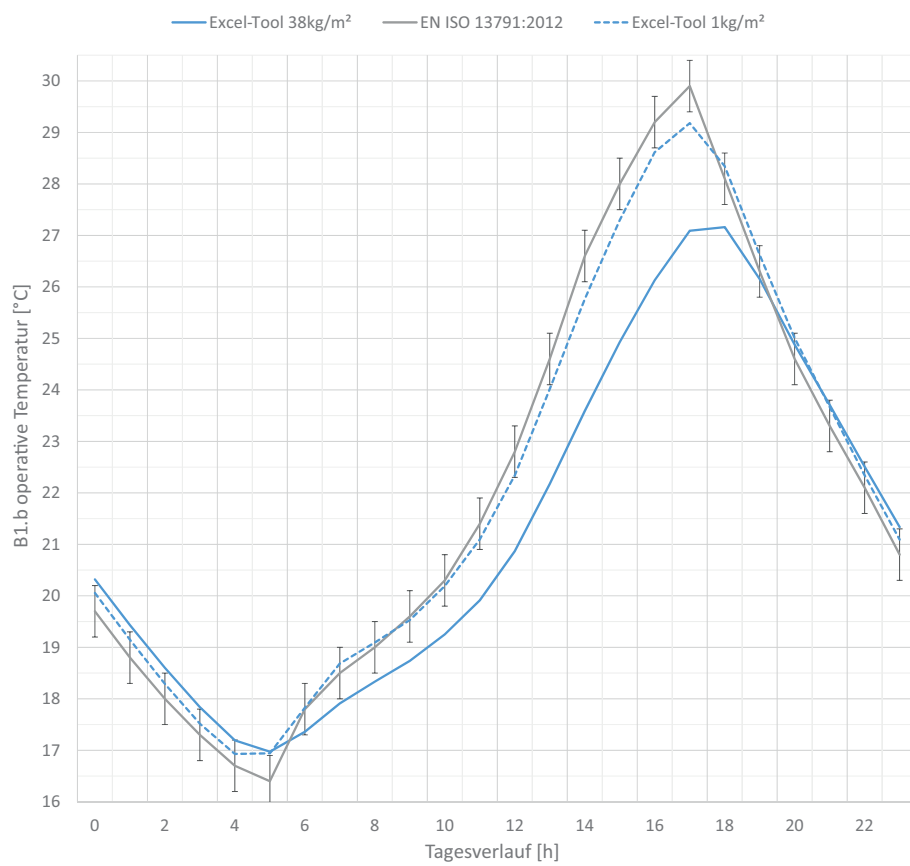
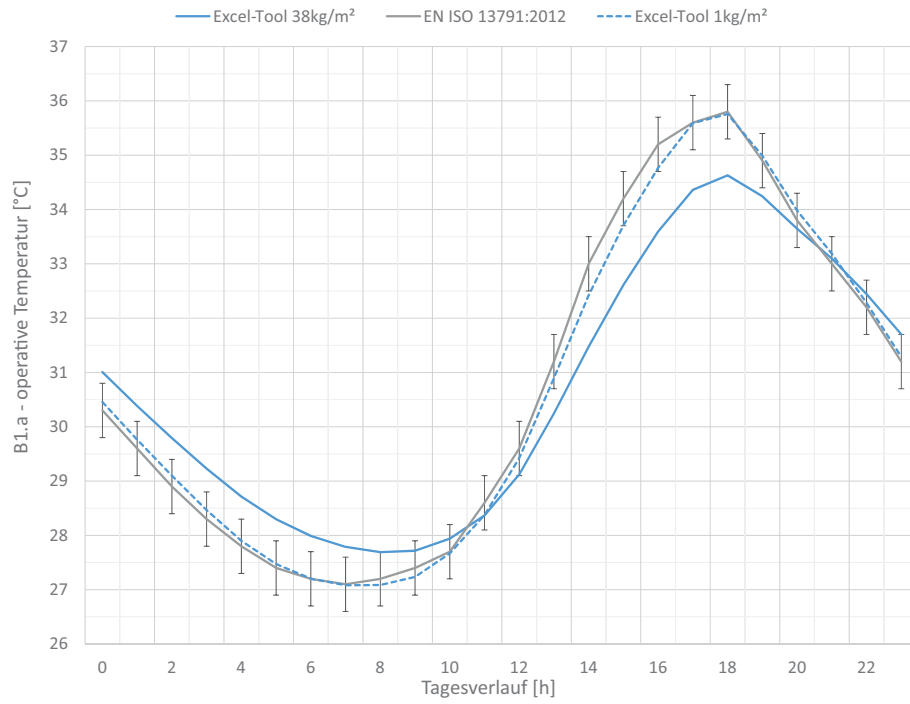
nachfolgend dargestellt. Um die Temperatur des Luftknotens zu ermitteln, werden in dem Algorithmus alle konvektiv basierten Wärmeströme summiert und durch die Wärmekapazität der „Einrichtung“ dividiert. Ohne Wärmekapazität der Einrichtung ist also eine Ermittlung unmöglich, weshalb die speicherwirksame Masse im Test nicht auf 0 sondern auf 1 kg reduziert wurde. Die beiden Ergebnisse für 38 kg vs. 1 kg speicherwirksamer Masse sind folgend dem Validierungsergebnis der Norm für alle Prüffälle gegenübergestellt.

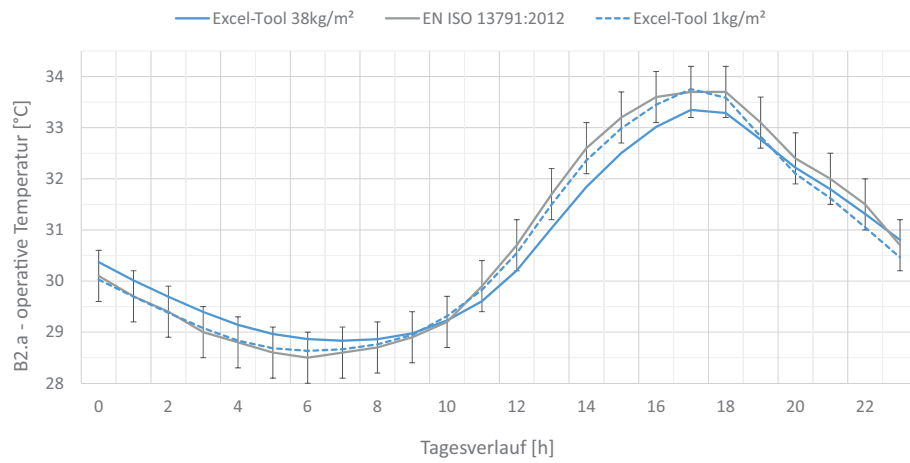
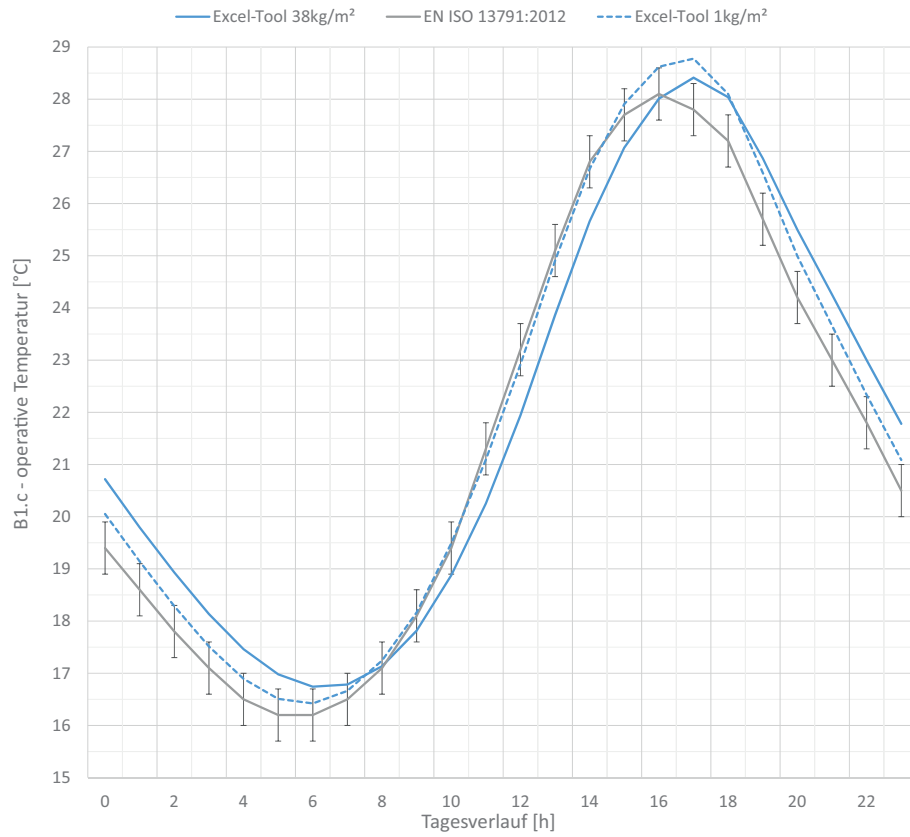


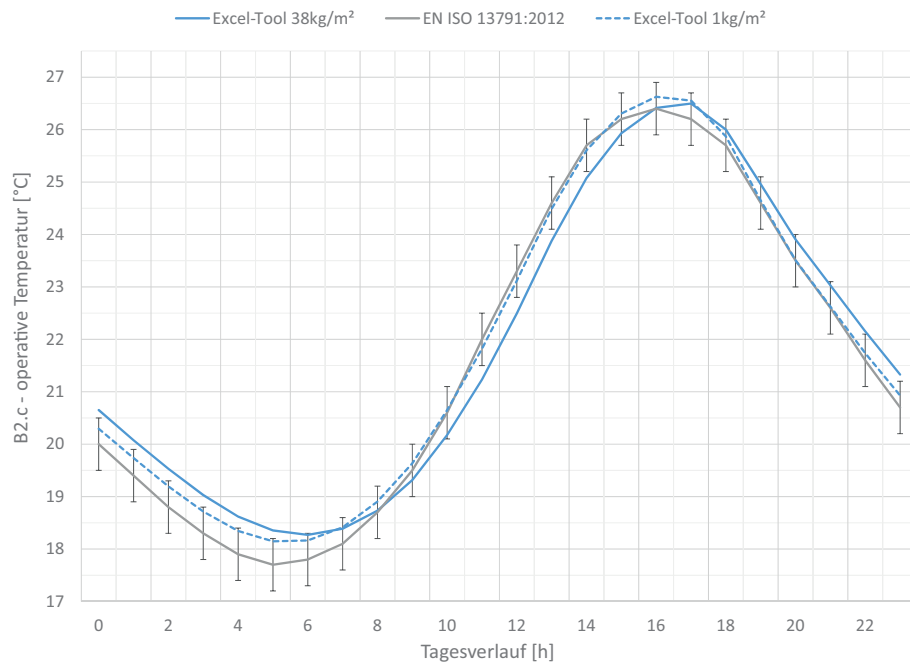
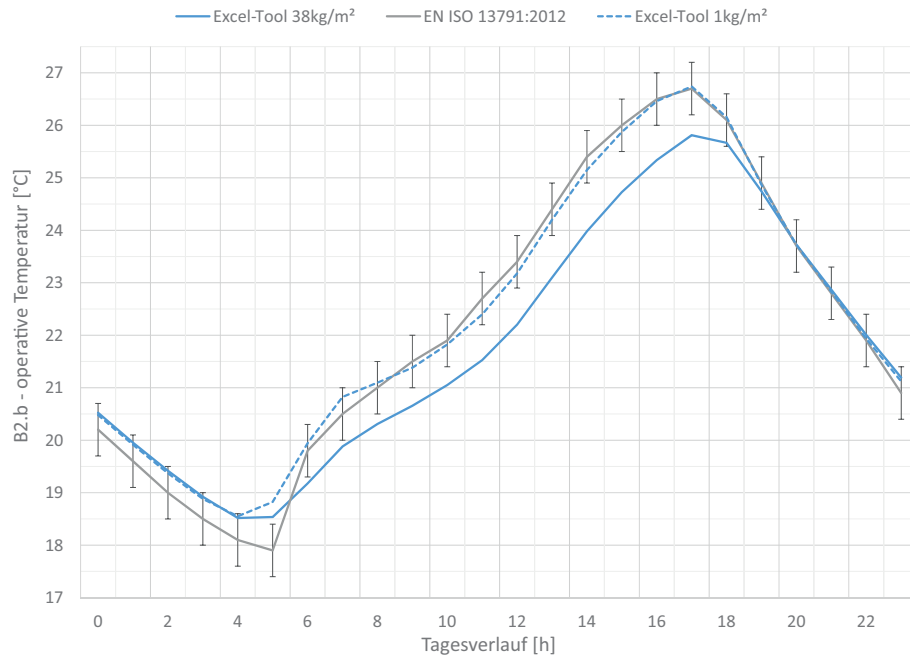


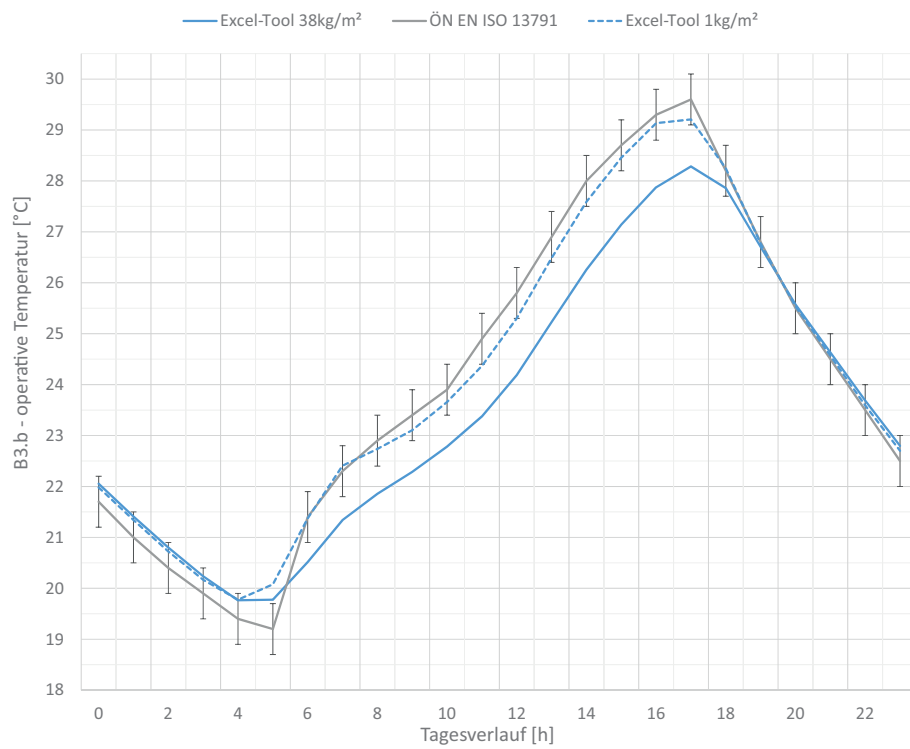
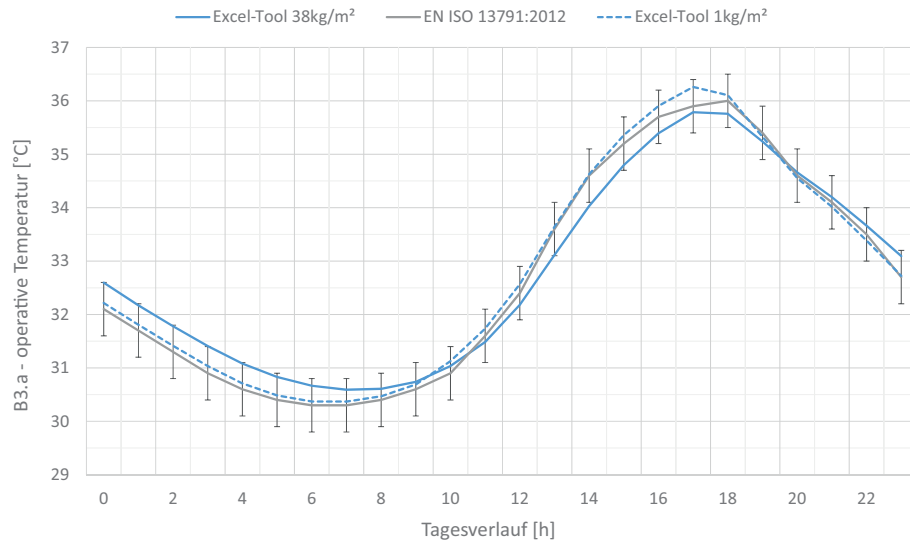




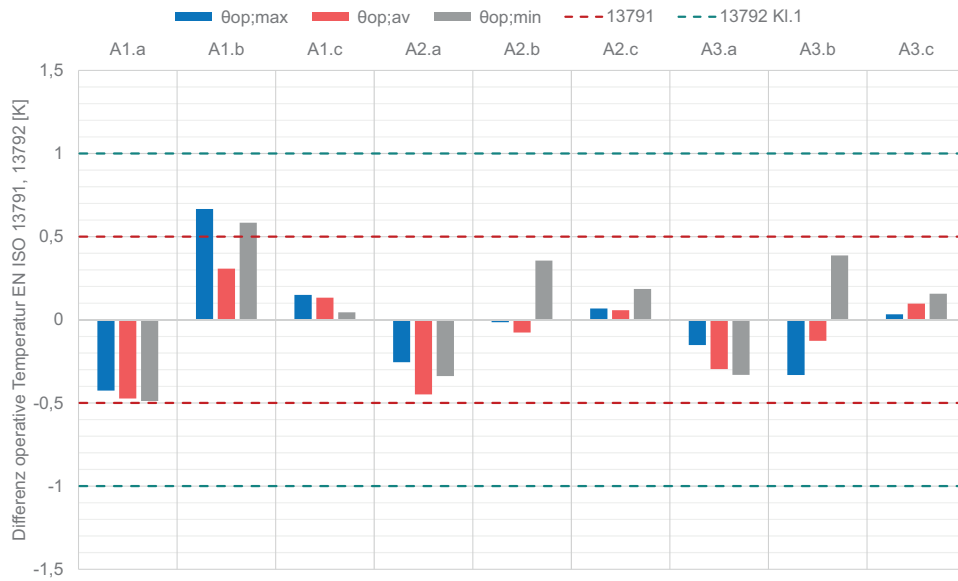




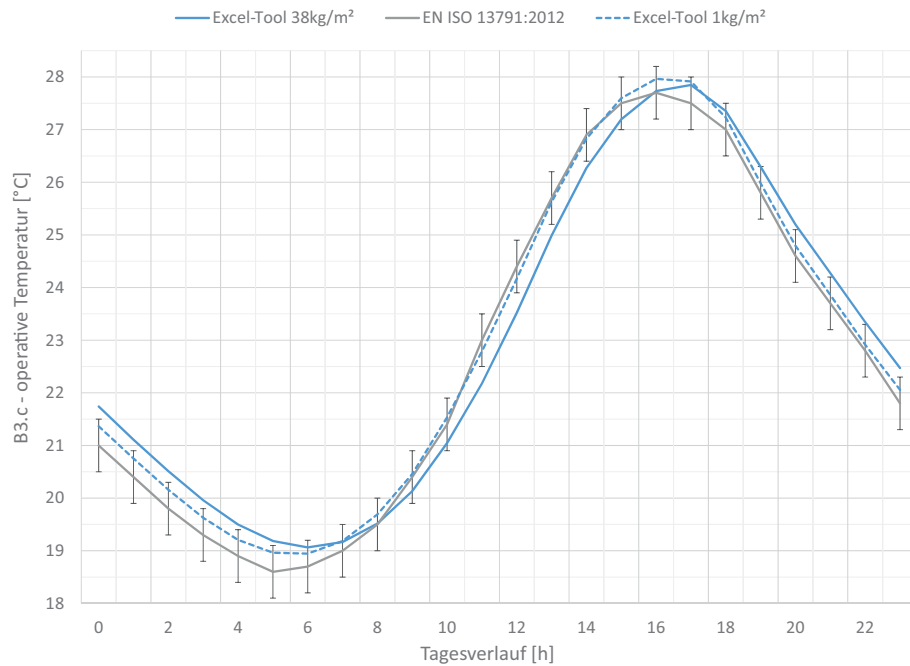








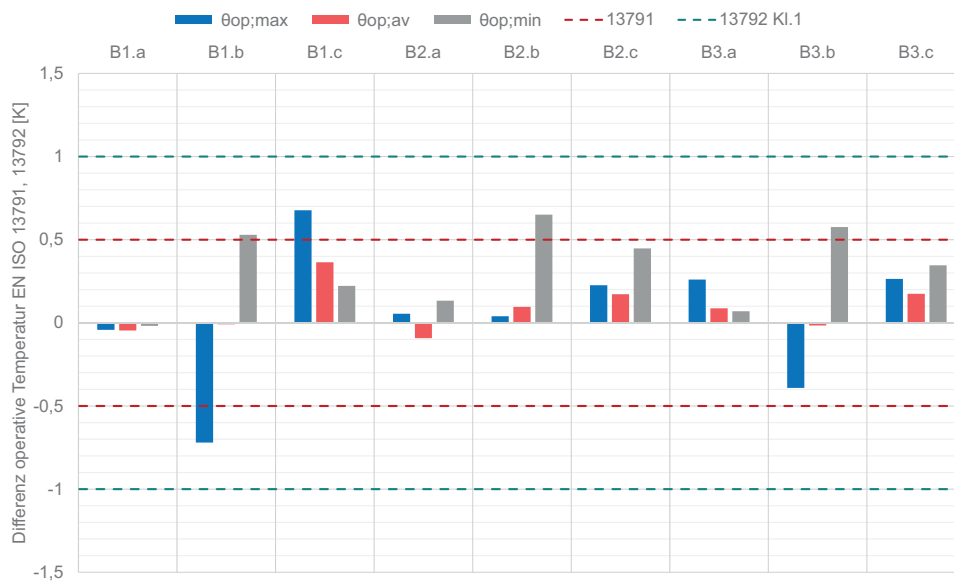
**Abbildung 5.3:** Excel-Tool „Prototyp für Bauphysiksoftware Österreich“ Validierung der Geometrie A.



In den Abbildungen 5.3 und 5.4 sind die Ergebnisse der einzelnen Prüffälle jeweils für Geometrie A und B bei 1 kg thermischer Einrichtungsmasse dargestellt.

Tabelle 5.3: Validierungsergebnisse des Excel-Tools (A1.a - B3.c)

Fall	Wert	38 kg/m <sup>2</sup>	1 kg/m <sup>2</sup>	Norm	Diff 38 kg/m <sup>2</sup>	Valid	Diff 1 kg/m <sup>2</sup>	Valid	13792 Kl.1
A1.a	$\Theta_{op,max}$	38,96	39,57	40,00	-1,041	X	-0,426	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	36,71	36,71	37,18	-0,473	OK	-0,473	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	34,73	34,31	34,80	-0,072	OK	-0,488	OK	OK
A1.b	$\Theta_{op,max}$	32,97	34,27	33,60	-0,626	X	0,667	X	OK
	$\Theta_{op,av}$	29,27	29,78	29,47	-0,205	OK	0,308	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	26,09	26,08	25,50	0,587	X	0,583	X	OK
A1.c	$\Theta_{op,max}$	33,74	33,95	33,80	-0,063	OK	0,150	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	29,46	29,46	29,33	0,133	OK	0,133	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	25,87	25,65	25,60	0,272	OK	0,045	OK	OK
A2.a	$\Theta_{op,max}$	38,32	38,54	38,80	-0,481	OK	-0,255	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	36,71	36,71	37,15	-0,448	OK	-0,448	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	35,42	35,26	35,60	-0,178	OK	-0,338	OK	OK
A2.b	$\Theta_{op,max}$	32,16	32,79	32,80	-0,636	X	-0,015	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	29,56	29,92	30,00	-0,435	OK	-0,076	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	27,13	27,16	26,80	0,333	OK	0,356	OK	OK
A2.c	$\Theta_{op,max}$	32,56	32,67	32,60	-0,044	OK	0,068	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	29,46	29,46	29,40	0,058	OK	0,058	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	26,88	26,79	26,60	0,283	OK	0,186	OK	OK
A3.a	$\Theta_{op,max}$	41,27	41,55	41,70	-0,435	OK	-0,152	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	39,36	39,36	39,65	-0,297	OK	-0,297	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	37,75	37,57	37,90	-0,154	OK	-0,332	OK	OK
A3.b	$\Theta_{op,max}$	34,70	35,37	35,70	-1,002	X	-0,332	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	31,42	31,84	31,96	-0,538	X	-0,126	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	28,47	28,49	28,10	0,373	OK	0,387	OK	OK
A3.c	$\Theta_{op,max}$	33,93	34,03	34,00	-0,069	OK	0,033	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	30,58	30,58	30,48	0,098	OK	0,098	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	27,75	27,66	27,50	0,248	OK	0,157	OK	OK
B1.a	$\Theta_{op,max}$	34,63	35,76	35,80	-1,171	X	-0,042	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	30,67	30,67	30,72	-0,046	OK	-0,046	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	27,69	27,08	27,10	0,592	X	-0,018	OK	OK
B1.b	$\Theta_{op,max}$	27,16	29,18	29,90	-2,739	X	-0,720	X	OK
	$\Theta_{op,av}$	21,35	22,07	22,08	-0,726	X	-0,009	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	16,97	16,93	16,40	0,573	X	0,530	X	OK
B1.c	$\Theta_{op,max}$	28,41	28,78	28,10	0,312	OK	0,677	X	OK
	$\Theta_{op,av}$	21,83	21,83	21,47	0,364	OK	0,364	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	16,74	16,42	16,20	0,542	X	0,222	OK	OK
B2.a	$\Theta_{op,max}$	33,35	33,75	33,70	-0,351	OK	0,055	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	30,67	30,67	30,76	-0,092	OK	-0,092	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	28,83	28,63	28,50	0,332	OK	0,133	OK	OK
B2.b	$\Theta_{op,max}$	25,81	26,74	26,70	-0,888	X	0,040	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	21,83	22,32	22,23	-0,399	OK	0,096	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	18,52	18,55	17,90	0,618	X	0,651	X	OK
B2.c	$\Theta_{op,max}$	26,50	26,63	26,40	0,098	OK	0,226	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	21,83	21,83	21,66	0,172	OK	0,172	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	18,27	18,15	17,70	0,569	X	0,447	OK	OK
B3.a	$\Theta_{op,max}$	35,79	36,26	36,00	-0,212	OK	0,260	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	32,79	32,79	32,70	0,088	OK	0,088	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	30,59	30,37	30,30	0,292	OK	0,070	OK	OK
B3.b	$\Theta_{op,max}$	28,28	29,21	29,60	-1,316	X	-0,392	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	23,60	24,14	24,15	-0,553	X	-0,016	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	19,76	19,78	19,20	0,565	X	0,576	X	OK
B3.c	$\Theta_{op,max}$	27,85	27,96	27,70	0,148	OK	0,265	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	22,90	22,90	22,73	0,175	OK	0,175	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	19,06	18,95	18,60	0,464	OK	0,346	OK	OK



**Abbildung 5.4:** Excel-Tool „Prototyp für Bauphysiksoftware Österreich“ Validierung der Geometrie B.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Simulation mit  $1 \text{ kg/m}^2$  thermischer Masse für die Einrichtung<sup>2</sup> bei den meisten Fällen näher an das Validierungsergebnis der Norm herankommt. Es können dabei 13 von 18 Prüffällen positiv validiert werden, bei dem Fall mit  $18 \text{ kg/m}^2$  sind es hingegen lediglich 8 von 18 Fällen. Das Tool ist somit nach EN ISO 13791:2012 nicht validiert.

Die Prüffälle der Geometrie A stimmen dabei bis auf den Fall A1.b sehr gut überein ( $\Delta_T < 0,5 \text{ K}$ ). Bei Fall A1.b muss es sich hinsichtlich den Normergebnissen um eine Unstimmigkeit handeln, da es auch bei den Validierungen der Programme Geba und Trnsys aus der Reihe fällt. In der Geba-, Trnsys- als auch Tas-Validierung wird auf diesen Spezialfall nochmals eingegangen. Die Ergebnisse der Geometrie B zeigen im Allgemeinen mehr Abweichungen als jene der Geometrie A.

Bei Betrachtung der Klassifizierung nach EN ISO 13792 ergibt sich entsprechend dem schlechtesten Prüfergebnis (Fall B1.b) die Klasse 1 – bezogen auf die Ergebnisse bei geringer thermischer Einrichtungsmasse von  $1 \text{ kg}$ . Das Ergebnis überschreitet in keinem Prüffall die Normwerte um  $+1 \text{ K}$  und unterschreitet sie in keinem Fall um  $-1 \text{ K}$  und ist damit als Klasse 1 einzustufen.

<sup>2</sup>0 kg sind aufgrund des Algorithmus in dieser Form nicht möglich festzulegen.

## 5.2 Geba

Die Ergebnisse der Validierung des einzigen periodisch eingeschwungenen Simulationsverfahrens in dieser vergleichenden Validierung werden folgend präsentiert. Tabelle 5.4 zeigt Validierungsparameter des Rechenmodells nach Vorgabe der Norm mit gegenübergestellter Erklärung der Abbildung in Geba V.10, ggf. mit entsprechenden Begründungen und Erläuterungen.

In Abbildung 5.5 und Abbildung 5.6 werden die Ergebnisse der Validierung nach EN ISO 13791:2012 für die Prüffälle der Geometrie A und B vorgestellt. Tabelle 5.5 listet die numerischen Werte und die Abweichungen zu den Normergebnissen auf.

Es zeigt sich, dass der Betrag der Abweichung von der Validierungsvorgabe mit Ausnahme von Fall A1.b kleiner als 1,0 K ist. Das mit Geba errechnete Maximum für Fall A1.b liegt mit 34,85 °C um 1,25 K höher als der in der EN ISO 13791 angegebene Wert 33,6 °C. Dieser Effekt wird auch im Validierungsbericht von Trnsys angesprochen und analysiert. Als Ergebnis dieser tief gehenden Analyse stellt sich heraus, dass es sich bei den von der EN ISO 13791 angegebenen Werten für den Fall A1.b um Werte einer nicht den Validierungsvorgaben entsprechenden Variante handeln muss.

**Tabelle 5.4:** Abbildung der Validierungsparameter der ÖNorm EN ISO 13791 für Prüffälle A1 bis B3 in Geba.

ÖNorm EN ISO 13791:2012	Geba
Thermophysikalische Eigenschaften (ÖNorm Tab. 14) opaker Wände	✓ Schichten der Bauteilaufbauten können durch Dicke $d$ , Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ , Rohdichte $\rho$ und spezifische Wärmekapazität $c$ lt. Norm abgebildet werden
Modellgeometrie (ÖNorm Tab. 13, ÖNorm Bild 11)	✓ Die geometrischen Merkmale des Prüfraumes können lt. Norm abgebildet werden
Spezifische Wärmekapazität der Luft 1008 J/(kgK); Luftdichte 1,139 kg/m <sup>3</sup>	✓ Die volumenbezogene spezifische Wärmekapazität der Luft (Blatt 1) wird gemäß Vorgabe auf 1,148 kJm <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> gesetzt

<p>Solare Kenngrößen der Glasscheiben des Verglasungssystems und die des außenliegenden Sonnenschutzes (ÖNorm Tab. 15, Bild 13): <math>R_{se} = 0,074 \text{ m}^2\text{K/W}</math>, <math>R_{cav} = 0,08 \text{ m}^2\text{K/W}</math>, <math>R_{si} = 0,125 \text{ m}^2\text{K/W}</math>.</p> <p>Wärmedurchlasswiderstand Fensterscheibenglas = <math>0 \text{ m}^2\text{K/W}</math>; Scheibe: <math>\tau_n = 0,84</math>; <math>\rho_n = 0,08</math>; Sonnenschutz: <math>\tau_n = 0,2</math>; <math>\rho_n = 0,5</math>; Wärmeübergangskoeffizienten siehe Tabellenzeile Randbedingungen. Abhängigkeit des Strahlungstransmissionsgrads vom Einfallswinkel der Sonne soll nicht berücksichtigt werden; es ist immer mit senkrechtem Strahlungseinfall zu rechnen.</p>	<p>✓ Der Wärmedurchlasswiderstand der Glasscheiben ist zu vernachlässigen. Um dies näherungsweise umzusetzen, wird die Schichtdicke sowohl der Glasscheiben als auch der Verschattungseinrichtung mit <math>0,0001 \text{ m}</math> angenommen und die Wärmeleitfähigkeit auf <math>430 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}</math> gesetzt (Blatt Normale Schichttypen, Typ 16 und 17). Der Durchlasswiderstand liegt damit bei <math>2 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{KW}^{-1}</math>.</p> <p>✓ Die strahlungstechnischen Eigenschaften der Verglasungen werden vorab mit Programm Stradur berechnet und die Glasdaten explizit eingegeben: Geometrie A: Einfachglas mit Außenverschattung resultierender Strahlungstransmissionsgrad: <math>\tau_s = 0,175</math> resultierender Strahlungsreflexionsgrad: <math>\rho_s = 0,503</math> Strahlungsabsorptionsgrad Verschattung: <math>\alpha_e = 0,305</math> Strahlungsabsorptionsgrad Scheibe: <math>\alpha_i = 0,017</math> Geometrie B: Zweifachglas mit Außenverschattung resultierender Strahlungstransmissionsgrad: <math>\tau_s = 0,1525</math> resultierender Strahlungsreflexionsgrad: <math>\rho_s = 0,5057</math> Strahlungsabsorptionsgrad Verschattung: <math>\alpha_e = 0,3090</math> Strahlungsabsorptionsgrad Außenscheibe: <math>\alpha_i = 0,0183</math> Strahlungsabsorptionsgrad Innenscheibe: <math>\alpha_i = 0,0145</math> Die Werte für Geometrie B sind in Anhang E (Berechnungsbeispiele) der EN ISO 13792:2012 explizit angegeben und stimmen mit den eingegebenen Werten exakt überein.</p> <p>✓ Die Unterdrückung der Abhängigkeit des Strahlungstransmissionsgrads vom Einfallswinkel der Sonne war in Geba nicht vorgesehen. Mittels Umprogrammierung wird erreicht, dass Geba mit konstantem, zeitunabhängigem Strahlungstransmissionsgrad rechnet.</p>
---	---

Sonnenparameter:	
Strahlungszuordnungsfaktor Luft $f_{sa} = 0,10$	✓ In Geba festgelegt.
solarer Verlustfaktor $f_{sl} = 0,00$ ;	✓ In Geba festgelegt.
solare Verteilungsfaktoren: Fußboden $f_d = 0,5$ Decke $f_d = 0,1$ gesamte vertikale Wände (außer Fenster) $f_d = 0,4$	✓ In Geba festgelegt.
solarer Absorptionsgrad aller Wandflächen $a_{sr} = 0,6$	✓ In Geba festgelegt.
solarer Absorptionsgrad des Daches $a_{sr} = 0,9$	✓ In Geba festgelegt.
Randbedingungen:	
Außerer Konvektionswärme- übergangskoeffizient $h_{c,e} = 8,0 \text{ W}/(\text{m}_2\text{K})$	✓ Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient wird auf $13,5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ gesetzt, was den Vorgaben (Summe aus Strahlungs- und Konvektionsübergangskoeffizient) entspricht.

<p>Innerer Konvektionswärmeübergangskoeffizient:  <math>h_{c,i} = 2,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math>  (Wärmestrom horizontal)  <math>h_{c,i} = 5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math>  (Wärmestrom aufwärts)  <math>h_{c,i} = 0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math>  (Wärmestrom abwärts)</p>	<p>~ Die inneren Wärmeübergangskoeff. werden gem. Vorgabe für Wände und Fenster auf <math>8,0 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}</math> (Summe von konvektivem und Strahlungsanteil) und für Decke (DE) und Fußboden (FB) auf <math>6,2 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}</math> gesetzt. Begründung: Der FB ist immer ein Innenbauteil. Die DE ist bei Prüfung 1 und 2 ein Innenbauteil, bei Prüfung 3 ein Außenbauteil (Flachdach). Die Richtung des Wärmestroms ist von vornherein nicht bekannt und wechselt im Tagesverlauf. Nach Validierungsvorgaben besteht für den Wärmeübergangskoeffizient von FB und DE eine Abhängigkeit von der Richtung des Wärmestroms. Er schwankt zwischen <math>6,2</math> (Wärmestrom nach unten) und <math>10,5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}</math> (Wärmestrom nach oben). Da die Geba-Ergebnisse zeigen, dass sich die Richtung des Wärmestroms im Tagesverlauf ändert, müsste bei FB und DE der Wärmeübergangskoeffizient zeitabhängig angesetzt werden. Dies ist jedoch mit der derzeitigen Geba-Version 10.0 nicht möglich. Es wird somit mit zeitunabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten gerechnet. Testrechnungen haben ergeben, dass die Wahl von <math>6,2 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}</math> für den Wärmeübergangskoeffizient sowohl für FB als auch für DE die beste Approximation an die Validierungsergebnisse bringt. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Wärmestrom sowohl bei DE als auch beim FB die meiste Zeit von oben nach unten gerichtet ist. Grund ist, dass am FB gemäß Vorgabe 50 % der Sonneneinstrahlung absorbiert werden, an der DE nur 10 %.</p>
---	---

	<p>Dies führt dazu, dass die Oberflächentemperatur des FB (bei gleicher Raumlufttemperatur) zumeist höher ist als jene der DE, was einen Wärmestrom durch DE und FB von oben nach unten auslöst. Da die Räume oberhalb und unterhalb des simulierten Raumes als gleichartig anzusehen sind, werden auf der vom simulierten Raum abgewandten Seite der DE die Quelldichten für den FB angesetzt; für den FB gilt Analoges.</p> <p>Anmerkung: Ob 6,2 oder 8,0 oder 10,5 Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup> gesetzt werden, beeinflusst das Ergebnis im Fall der nicht weggedämmten Decke (Prüfung 2) erheblich!</p>
<p>Strahlungswärmeübergangskoeffizient <math>h_{r,e} = 5,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math> (alle Oberflächen). (Gültig für <math>\varepsilon = 0,93</math> und <math>T_{mr} = 303 \text{ K}</math>)</p>	<p>✓ Bei der Definition der Außenräume ist zu beachten, dass für die Validierungsbeispiele der langwellige Strahlungsaustausch nicht berücksichtigt werden darf! In Geba wird dies erreicht, indem die Absorptionszahl für langwellige Strahlung für die äußeren Oberflächen der Außenbauteile auf den Wert 0,001 gesetzt wird.</p>
<p>Klimadaten: Sonnenstrahlung: Die Komponenten der Sonnenstrahlung (direkt, diffus, reflektiert) sind in Stundenwerten in ÖNorm Tab. 16 und 17 jeweils für die Horizontal- und vertikale Westfläche angegeben</p>	<p>✓ Die vorgegebenen Stundenwerte können in Geba direkt eingelesen werden.</p>
<p>Außenlufttemperatur: Die Außentemperatur ist in Stundenwerten in ÖNorm Tab. 18 und 19 angegeben</p>	<p>✓ Die vorgegebenen Stundenwerte können in Geba direkt eingelesen werden.</p>





Abbildung 5.5: Geba Validierung Geometrie A.

Innere Energiequellen sind in ÖNorm Tab. 20 und in Bild 18 in stündlichen [W/m <sup>2</sup> ]-Werten angegeben. Wärmestromaufteilung zu je 50 % durch Konvektion und Strahlung	✓ Interpolation der Werte der Norm zum Erhalt von Momentanwerten zu den vollen Stunden.
Lüftung: 3 verschiedene Lüftungsmuster a, b und c werden in stündlichen Werten in der ÖNorm Tab. 21 vorgegeben	✓ Interpolation der Werte der Norm zum Erhalt von Momentanwerten zu den vollen Stunden.

Unter Ausschluss der Variante A1.b ergibt sich für Programmpaket Geba V.10 folgendes Validierungsergebnis:

1. 10 der 18 Varianten weichen um weniger als 0,5 K vom Validierungsergebnis ab. Die restlichen 8 Varianten zeigen Abweichungen, deren Betrag zwar größer als 0,5 K, jedoch kleiner als 1,0 K ist.
2. Geba ist somit nach EN ISO 13791:2012 nicht validiert (maximale Abweichung  $\pm 0,5$  K für alle Berechnungsfälle). In Anbetracht, dass Geba als Näherungsverfahren angesehen werden kann, er-

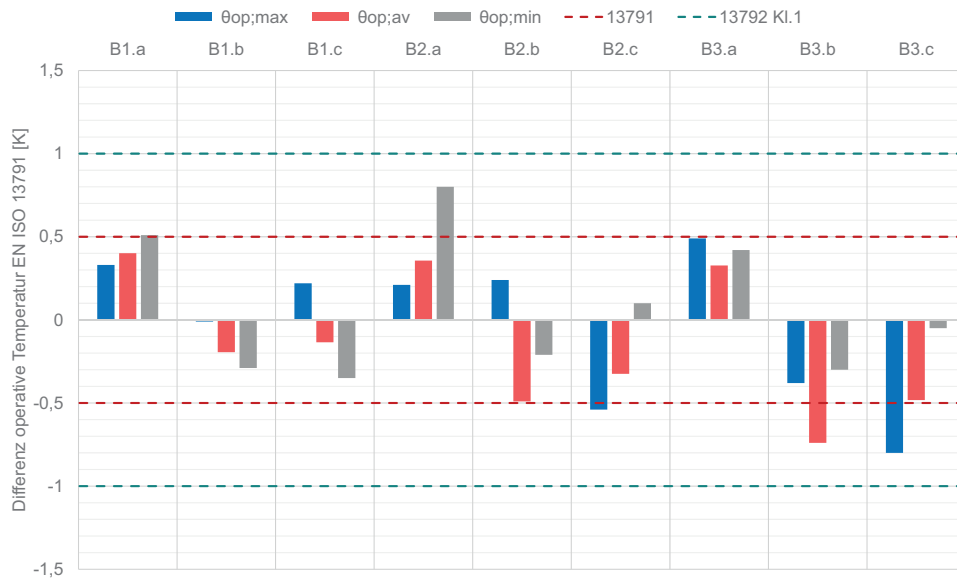


Abbildung 5.6: Geba Validierung Geometrie B.

scheint eine Validierung nach EN ISO 13791 ähnlich wie bei dem Excel Tool in Abschnitt 4.2.1 als nicht notwendig.

3. Nach der Klasseneinteilung der EN ISO 13792:2012 fällt Geba in die beste Klasse (Klasse 1; maximale Abweichung  $\pm 1,0$  K für alle Berechnungsfälle).

**Tabelle 5.5:** Validierungsergebnisse Geba (A1.a - B3.c).

Fall	Wert	Geba	Norm	Diff	Valid	13792 Kl.1
A1.a	$\Theta_{op,max}$	40,61	40,00	0,610	X	OK
	$\Theta_{op,av}$	37,32	37,18	0,144	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	34,78	34,80	-0,020	OK	OK
A1.b	$\Theta_{op,max}$	34,85	33,60	1,250	X	X
	$\Theta_{op,av}$	29,72	29,47	0,253	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	25,51	25,50	0,010	OK	OK
A1.c	$\Theta_{op,max}$	34,03	33,80	0,230	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	29,17	29,33	-0,159	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	25,21	25,60	-0,390	OK	OK
A2.a	$\Theta_{op,max}$	39,32	38,80	0,520	X	OK
	$\Theta_{op,av}$	37,32	37,15	0,167	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	35,84	35,60	0,240	OK	OK
A2.b	$\Theta_{op,max}$	32,59	32,80	-0,210	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	29,53	30,00	-0,470	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	26,68	26,80	-0,120	OK	OK
A2.c	$\Theta_{op,max}$	32,59	32,60	-0,010	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	29,17	29,40	-0,234	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	26,40	26,60	-0,200	OK	OK
A3.a	$\Theta_{op,max}$	42,00	41,70	0,300	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	39,84	39,65	0,189	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	38,22	37,90	0,320	OK	OK
A3.b	$\Theta_{op,max}$	34,97	35,70	-0,730	X	OK
	$\Theta_{op,av}$	31,31	31,96	-0,653	X	OK
	$\Theta_{op,min}$	27,99	28,10	-0,110	OK	OK
A3.c	$\Theta_{op,max}$	33,69	34,00	-0,310	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	30,17	30,48	-0,312	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	27,30	27,50	-0,200	OK	OK
B1.a	$\Theta_{op,max}$	36,13	35,80	0,330	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	31,12	30,72	0,401	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	27,61	27,10	0,510	X	OK
B1.b	$\Theta_{op,max}$	29,89	29,90	-0,010	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	21,88	22,08	-0,195	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	16,11	16,40	-0,290	OK	OK
B1.c	$\Theta_{op,max}$	28,32	28,10	0,220	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	21,34	21,47	-0,135	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	15,85	16,20	-0,350	OK	OK
B2.a	$\Theta_{op,max}$	33,91	33,70	0,210	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	31,12	30,76	0,356	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	29,30	28,50	0,800	X	OK
B2.b	$\Theta_{op,max}$	26,94	26,70	0,240	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	21,73	22,23	-0,490	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	17,69	17,90	-0,210	OK	OK
B2.c	$\Theta_{op,max}$	25,86	26,40	-0,540	X	OK
	$\Theta_{op,av}$	21,34	21,66	-0,325	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	17,80	17,70	0,100	OK	OK
B3.a	$\Theta_{op,max}$	36,49	36,00	0,490	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	33,03	32,70	0,327	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	30,72	30,30	0,420	OK	OK
B3.b	$\Theta_{op,max}$	29,22	29,60	-0,380	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	23,41	24,15	-0,740	X	OK
	$\Theta_{op,min}$	18,90	19,20	-0,300	OK	OK
B3.c	$\Theta_{op,max}$	26,90	27,70	-0,800	X	OK
	$\Theta_{op,av}$	22,24	22,73	-0,483	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	18,55	18,60	-0,050	OK	OK



Abbildung 5.7: Trnsys Validierung Geometrie A.

### 5.3 Trnsys

Auch für das thermisch dynamische Gebäudesimulationsprogramm Trnsys 17.1 sollte eine Validierung nach EN ISO 13791:2012 durchgeführt werden. Nach selbständiger Modellierung der Prüffälle im Zuge der Arbeit und darauf folgender Korrespondenz mit Transsolar aufgrund Unklarheiten in der Modellierung, wurde schließlich die Validierung durch Transsolar selbst durchgeführt. Die Projektdateien, als auch ein Validierungsbericht [49] wurden für diese Arbeit zur Verfügung gestellt. Die folgenden Ergebnisse beziehen sich auf diese Datengrundlage.

In Abbildung 5.7 und Abbildung 5.8 werden die Ergebnisse der Validierung nach EN ISO 13791:2012 für die Prüffälle der Geometrie A und B vorgestellt. Tabelle 5.6 listet die numerischen Werte und die Abweichungen zu den Normergebnissen auf.

Das Ergebnis zeigt, dass alle Fälle außer dem Testfall A1.b die Validierung innerhalb der von der Norm vorgegebenen Grenzen erfüllen. Die maximale operative Temperatur im Prüffall A1.b übersteigt den vorgegeben Validierungswert erheblich. Aufgrund der guten Übereinstimmung der Ergebnisse der anderen „b“-Fälle sowie der Tests A1.a und A1.c ist es auch für Transsolar sehr unwahrscheinlich, dass die große Abweichung auf einen Softwarefehler zurückzuführen ist. Vielmehr wird eine Inkonsistenz der Referenzwerte innerhalb der Norm

**Tabelle 5.6:** Validierungsergebnisse Trnsys (A1.a - B3.c).

Fall	Wert	Trnsys	Norm	Diff	Valid	13792 Kl.1
A1.a	$\Theta_{op,max}$	39,85	40,00	-0,153	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	37,03	37,18	-0,153	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	34,66	34,80	-0,138	OK	OK
A1.b	$\Theta_{op,max}$	34,96	33,60	1,357	X	X
	$\Theta_{op,av}$	30,27	29,47	0,802	X	OK
	$\Theta_{op,min}$	25,92	25,50	0,420	OK	OK
A1.c	$\Theta_{op,max}$	33,83	33,80	0,032	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	29,39	29,33	0,062	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	25,69	25,60	0,094	OK	OK
A2.a	$\Theta_{op,max}$	38,84	38,80	0,038	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	37,15	37,15	-0,009	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	35,65	35,60	0,054	OK	OK
A2.b	$\Theta_{op,max}$	32,83	32,80	0,035	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	30,06	30,00	0,069	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	26,99	26,80	0,186	OK	OK
A2.c	$\Theta_{op,max}$	32,57	32,60	-0,030	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	29,45	29,40	0,048	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	26,74	26,60	0,149	OK	OK
A3.a	$\Theta_{op,max}$	41,82	41,70	0,115	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	39,85	39,65	0,203	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	38,18	37,90	0,282	OK	OK
A3.b	$\Theta_{op,max}$	35,97	35,70	0,265	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	32,24	31,96	0,280	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	28,51	28,10	0,409	OK	OK
A3.c	$\Theta_{op,max}$	34,02	34,00	0,017	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	30,67	30,48	0,195	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	27,82	27,50	0,320	OK	OK
B1.a	$\Theta_{op,max}$	35,80	35,80	-0,003	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	30,87	30,72	0,153	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	27,38	27,10	0,279	OK	OK
B1.b	$\Theta_{op,max}$	29,80	29,90	-0,104	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	22,23	22,08	0,154	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	16,64	16,40	0,237	OK	OK
B1.c	$\Theta_{op,max}$	28,13	28,10	0,031	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	21,64	21,47	0,165	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	16,42	16,20	0,221	OK	OK
B2.a	$\Theta_{op,max}$	33,76	33,70	0,062	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	30,96	30,76	0,200	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	28,87	28,50	0,365	OK	OK
B2.b	$\Theta_{op,max}$	26,44	26,70	-0,263	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	22,29	22,23	0,064	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	18,19	17,90	0,289	OK	OK
B2.c	$\Theta_{op,max}$	26,18	26,40	-0,216	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	21,72	21,66	0,057	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	18,00	17,70	0,301	OK	OK
B3.a	$\Theta_{op,max}$	36,08	36,00	0,082	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	33,00	32,70	0,298	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	30,70	30,30	0,407	OK	OK
B3.b	$\Theta_{op,max}$	29,37	29,60	-0,227	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	24,30	24,15	0,147	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	19,56	19,20	0,358	OK	OK
B3.c	$\Theta_{op,max}$	27,55	27,70	-0,154	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	22,86	22,73	0,130	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	18,96	18,60	0,365	OK	OK

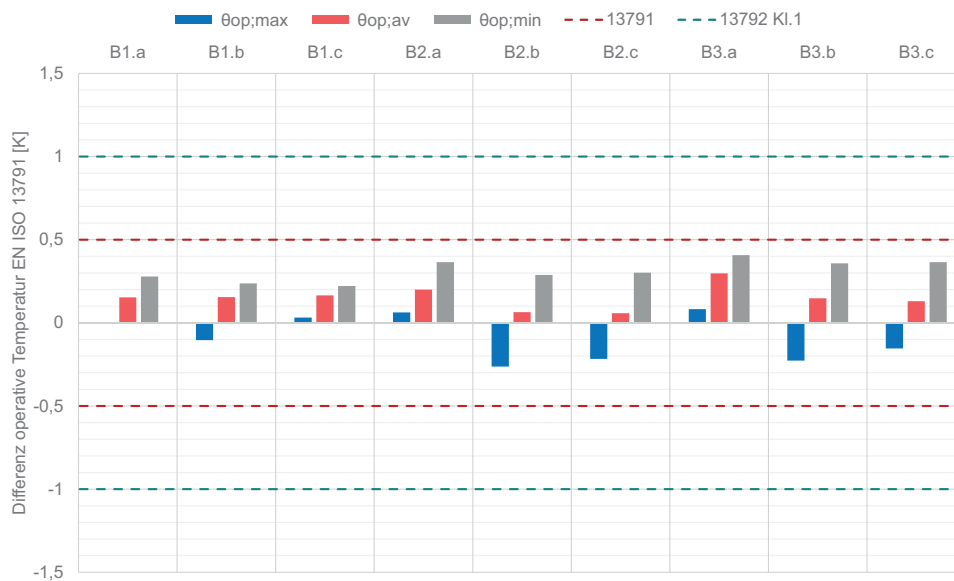


Abbildung 5.8: Trnsys Validierung Geometrie B.

EN ISO 13791:2012 vermutet. Diese Vermutung lässt sich auch bei der Validierung von Geba eindeutig nachvollziehen.

Die Vergleichsergebnisse des Standards haben sich gegenüber der Vorgängerversion 2005 deutlich verändert. Alle Bezugsergebnisse wurden mit Ausnahme des Falles A1.b erhöht. Für Fall A1.b wurde die maximale Betriebstemperatur sogar um 0,5 K verringert. Keine der erwähnten Änderungen in der DIN EN ISO 13791: 2012 kann diesen Unterschied verursachen (vgl. [49]).

## 5.4 Tas

Die Validierung von Tas 9.3.0 nach EN ISO 13791:2012 ist vom Hersteller EDSL selbst durchgeführt und unter [17] veröffentlicht worden. Die Projektdateien, als auch ein Validierungsbericht [16] stehen zur Verfügung. Die folgenden Ergebnisse beziehen sich auf diese Datengrundlage.

In Abbildung 5.11 und Abbildung 5.12 werden die Ergebnisse der Validierung nach EN ISO 13791:2012 für die Prüffälle der Geometrie A und B vorgestellt. Tabelle 5.7 listet die numerischen Werte und die Abweichungen zu den Normergebnissen auf.

Die Modellierung kann laut dem Bericht nach den Normvorgaben ausgeführt werden, lediglich bezüglich den Klimadaten und den Wärmeübergangskoeffizienten wird im Validierungsbericht folgendes vermerkt:

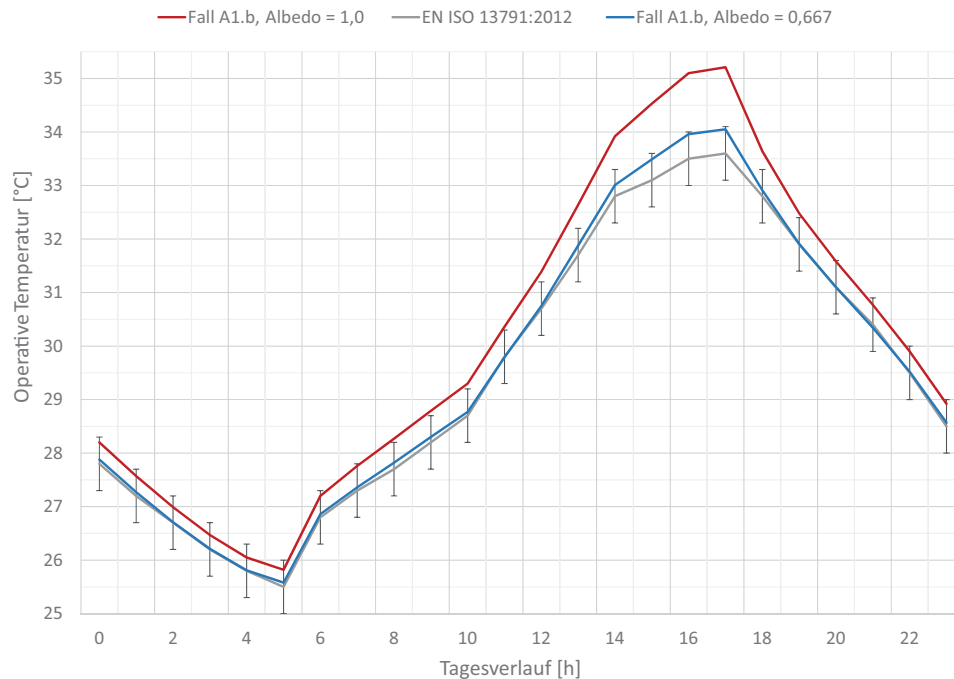
Die Werte für den Verlauf der Außentemperatur sowie der solaren Strahlung werden in der Norm als Momentanwerte zu jeder Stunde angegeben. Diese wurden für die Tas Validierung im Zuge einer Vorgeberechnung auf Mittelwerte umgerechnet.

In dem Tas-Modell wurde der Emissionsgrad der externen Oberflächen auf Null gesetzt und die Windgeschwindigkeit auf einen konstanten Wert von 2,375 m/s eingestellt, was den vorgegebenen Gesamt-Wärmeübergangskoeffizienten von 13,5 W/(m<sup>2</sup>K) ( $4 + 4 \times$  Windgeschwindigkeit) ergibt. Den langwelligen Strahlungsaustausch im Innenraum berechnet Tas auf der Basis von Emissionsgraden der Oberflächen, wobei diese Werte so eingestellt wurden, dass sie so nahe wie möglich an die vorgegebenen 5,5 W/(m<sup>2</sup>K) kommen.

Tatsächlich wurde einiger Aufwand betrieben um die Normvorgaben in Tas einhalten zu können, die in dem Validierungsbericht nicht aufscheinen. Die Erkenntnisse werden folgend zusammengefasst, zuvor soll jedoch eine weitreichendere Unstimmigkeit in der Tas Validierung aufgezeigt werden.

Bei Überprüfung der Validierungsergebnisse der durch EDSL durchgeführten Validierung stellt sich die Frage, warum Tas als einziges der im Zuge der Arbeit hinsichtlich Validierung analysierten Programme eine vollständige Übereinstimmung mit den Normergebnissen der EN ISO 13791:2012 zeigt – auch in dem Fall A1.b, wo bei Geba und Trn-sys klare Abweichungen auftreten und damit eine Unstimmigkeit in den Norm-Validierungsergebnissen erahnen lassen. Ein Vergleich der Simulationsparameter der unterschiedlichen Prüffälle zeigt, dass genau bei diesem Fall der Albedo-Wert, d. h. der im Programm sogenannte „Boden-Strahlungsreflexionsgrad“ in Tas reduziert wurde. Dieser müsste jedoch in allen Prüffällen den gleichen Wert aufweisen. Bei Angleichung dieses Wertes wie in den anderen Prüffällen, erhöht sich die Solarstrahlung auf die westorientierten Außenbauteile, was zu einer Erhöhung der solaren Wärmeeinträge im Raum und damit zu einer Erhöhung der operativen Raumtemperatur führt. Die Differenz zum Normergebnis beträgt dann für den Maximalwert der operativen Raumtemperatur 1,6 K, wie in Abbildung 5.9 ersichtlich.

Abbildung 5.10 zeigt die internen solaren Einträge des Validierungsraumes der Geometrie A bei Lüftungsfall a vs. b der Tas Ergebnisse, jenen von Geba gegenübergestellt. Es sollten alle drei das selbe Ergebnis liefern. Neben der in Tas offensichtlich falsch eingestellten solaren Strahlungsflüsse auf die Westfassade bei Fall A1.b fällt auch auf, dass die strahlungstechnischen Werte der Einfachverglasung bei Tas abweichen. Der Strahlungstransmissionsgrad liegt bei den von Geba verwendeten Werten bei 0,175 (vs. Tas 0,212), der Strahlungsreflexionsgrad



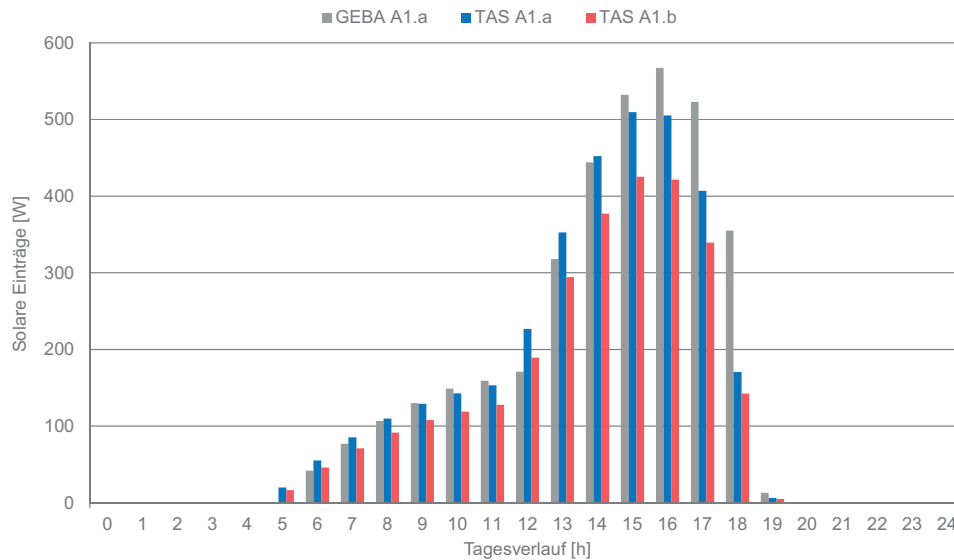
**Abbildung 5.9:** Tas Fall A1.b Unstimmigkeit in der Validierung nach EN ISO 13791:2012.

bei 0,503 (vs. Tas 0,466).

Wie in Grafik 5.9 ersichtlich, ist der von EDSL verwendete Albedo-Wert für den Fall A1.b mit 0,667 angegeben. In allen anderen Prüffällen ist die Albedo mit 1,0 eingetragen. Dies erscheint auf ersten Blick fehlerhaft, da die Werte im Normalfall zwischen 0,1 und 0,4 liegen. Der Norm-Wert der ÖNorm B 8110-3 ist 0,2 (= grüne Wiese). Ein Albedo-Wert von 0,667 wird nicht einmal durch frischen Schnee erreicht. Einen Albedo-Wert von 1 gibt es in der Natur nicht. Eine weitere Analyse der Tas-spezifischen Modellierung der Validierungsfälle erklärt diese Werte:

Tas liest – wie Trnsys – Strahlungsdaten auf die horizontale Fläche ein und rechnet diese über ein programminternes Modell auf geneigte Flächen um. Offenkundig wurde es nicht erreicht, die horizontale Einstrahlung derart zu modellieren, dass die Bestrahlungsstärken auf die Westfassade (die ja stark in das Ergebnis eingehen) mit den Normvorgaben übereinstimmen. Aus diesem Grund dürfte EDSL den Weg gewählt haben, in dem sogenannten „Cooling Design Day“, der als Klimagrundlage zur Simulation zigfach wiederholt angesetzt wird, die Globalstrahlung auf die horizontale Fläche rein als Diffusstrahlung einzuführen. Die Umrechnung der Diffusstrahlung von der horizontalen Fläche auf die vertikale Westfassade wird dann zu keiner Änderung





**Abbildung 5.10:** Interne Solarlasten bei Prüffall A1.a vs. A1.b. Vergleich zu Geba Ergebnissen.

führen, wenn der Albedo-Wert auf 1 gesetzt wird. Damit führt dieser physikalisch eigentlich unsinnige Ansatz zu korrekter Bestrahlungsstärke auf die Westfassade (jedoch nicht im Fall A1.b, wo der Albedo-Wert auf 0,667 reduziert wurde). Dass diese Vorgangsweise erlaubt ist, liegt daran, dass die Winkelabhängigkeit des Strahlungsdurchgangs durch die Verglasung vernachlässigt werden soll. Damit ist Direktstrahlung, Himmelsstrahlung und terrestrische Reflexstrahlung gleichwertig. Dass diese Anteile in der EN ISO 13791 getrennt angegeben sind, ist daher unnötig – und natürlich irreführend.

Für die A3 und B3 Prüffälle der Norm (mit Flachdach statt Innendecke) wurde über dem Testraum ein weiterer (fiktiver) Raum namens „Surround“ modelliert, welchem die Außenlufttemperatur zugeordnet und dem Fußboden (also der Oberfläche des Flachdachs) die absorbierte Globalstrahlung als Innenwärme aufgeprägt wird. Die tatsächliche Globalstrahlung auf die Horizontale mit der Absorptionszahl für das Flachdach (0,9) multipliziert führt zu den angegebenen Innenwärmern der fiktiven Zone „Surround“.

Das Ergebnis zeigt nach Eigenbeurteilung von EDSL eine vollständige Validierung aller Prüffälle nach EN ISO 13791:2012. Nach Überprüfung und Analyse der Validierung ist jedoch offensichtlich z. B. bei Prüffall A1.b am Parameter Albedo unzulässig manipuliert worden – zugunsten einer positiven Validierung. Auch die strahlungstechnischen Werte der Einfachverglasung in Tas weichen von Vergleichsrechnun-

**Tabelle 5.7:** Validierungsergebnisse Tas (A1.a - B3.c).

Fall	Wert	Tas	Norm	Diff	Valid	13792 Kl.1
A1.a	$\Theta_{op,max}$	40,15	40,00	0,150	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	37,16	37,18	-0,019	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	34,7	34,80	-0,100	OK	OK
A1.b	$\Theta_{op,max}$	34,05	33,60	0,450	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	29,58	29,47	0,109	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	25,58	25,50	0,080	OK	OK
A1.c	$\Theta_{op,max}$	33,88	33,80	0,080	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	29,32	29,33	-0,009	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	25,57	25,60	-0,030	OK	OK
A2.a	$\Theta_{op,max}$	38,99	38,80	0,190	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	37,15	37,15	-0,004	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	35,61	35,60	0,010	OK	OK
A2.b	$\Theta_{op,max}$	33,11	32,80	0,310	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	30,11	30,00	0,114	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	26,9	26,80	0,100	OK	OK
A2.c	$\Theta_{op,max}$	32,71	32,60	0,110	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	29,42	29,40	0,016	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	26,63	26,60	0,030	OK	OK
A3.a	$\Theta_{op,max}$	41,77	41,70	0,070	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	39,61	39,65	-0,044	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	37,76	37,90	-0,140	OK	OK
A3.b	$\Theta_{op,max}$	35,99	35,70	0,290	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	32,04	31,96	0,077	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	28,15	28,10	0,050	OK	OK
A3.c	$\Theta_{op,max}$	34,07	34,00	0,070	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	30,47	30,48	-0,009	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	27,49	27,50	-0,010	OK	OK
B1.a	$\Theta_{op,max}$	35,97	35,80	0,170	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	30,87	30,72	0,153	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	27,26	27,10	0,160	OK	OK
B1.b	$\Theta_{op,max}$	30,21	29,90	0,310	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	22,27	22,08	0,195	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	16,5	16,40	0,100	OK	OK
B1.c	$\Theta_{op,max}$	28,21	28,10	0,110	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	21,53	21,47	0,059	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	16,26	16,20	0,060	OK	OK
B2.a	$\Theta_{op,max}$	33,72	33,70	0,020	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	30,82	30,76	0,057	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	28,61	28,50	0,110	OK	OK
B2.b	$\Theta_{op,max}$	26,82	26,70	0,120	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	22,31	22,23	0,085	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	18,03	17,90	0,130	OK	OK
B2.c	$\Theta_{op,max}$	26,45	26,40	0,050	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	21,66	21,66	-0,002	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	17,81	17,70	0,110	OK	OK
B3.a	$\Theta_{op,max}$	35,82	36,00	-0,180	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	32,62	32,70	-0,080	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	30,21	30,30	-0,090	OK	OK
B3.b	$\Theta_{op,max}$	29,45	29,60	-0,150	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	24,06	24,15	-0,094	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	19,19	19,20	-0,010	OK	OK
B3.c	$\Theta_{op,max}$	27,62	27,70	-0,080	OK	OK
	$\Theta_{op,av}$	22,62	22,73	-0,105	OK	OK
	$\Theta_{op,min}$	18,62	18,60	0,020	OK	OK



Abbildung 5.11: Tas Validierung Geometrie A.



Abbildung 5.12: Tas Validierung Geometrie B.

gen ab, weshalb auch abgesehen von dem Sonderfall A1.b eine positive Validierung von Tas nicht mit Sicherheit gewährleistet ist.

## Kapitel 6

# Planungshilfe für ArchitektInnen

### 6.1 Allgemein gültige Planungshinweise

Wie in Abschnitt 2.5 erläutert, haben sehr viele Faktoren Einfluss auf das sommerliche Verhalten von Räumen oder gesamten Gebäuden. Dabei ist es oft nicht zielführend, sich auf einzelne Parameter zu konzentrieren – vielmehr ist eine gesamtheitliche Betrachtung der Einflüsse wichtig. So beeinflussen sich z. B. der Energieeintrag, die Lüftung und die speicherwirksame Masse des Raumes gegenseitig und müssen aufeinander abgestimmt werden. Das wiederum ist projektspezifisch und kann nicht pauschal auf einfache Weise beurteilt oder quantitativ bewertet werden. Aus diesem Grund sind thermisch dynamische Simulationsprogramme, die eine gesamtheitliche Betrachtung erlauben, sehr wichtig hinsichtlich der Planungssicherheit und einer realistischen Abschätzung des sommerlichen Verhaltens. Bei Verständnis der in der Arbeit einführend diskutierten Grundlagen, vor allem der in Abschnitt 2.5 angeführten Einflussfaktoren, können Planungsmaßnahmen abgeleitet werden, die tendenziell die operativen Raumtemperaturen niedrig halten. An dieser Stelle sollen einige solcher allgemeinen Hinweise gegeben werden:

Durch den gewichtigen Einfluss der solaren Einträge sollte in der Planung zuerst auf diesen Parameter reagiert werden. Durch die sommerlich hohen solaren Strahlungsflüsse auf horizontale bzw. der Sonne zugeneigte Flächen, sollten Dachflächenfenster wo möglich reduziert werden, durch entsprechende Sonnenschutzmaßnahmen beschattet und sich deren Glas durch einen möglichst geringen Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) auszeichnen. Hier bieten sich auch Sonnenschutzgläser an, die bereits g-Werte bis 0,2 erreichen – dabei ist jedoch immer auf

eine ausreichende Lichtdurchlässigkeit zu achten, die sich damit auch reduziert. Im Allgemeinen zeichnen sich aber auch schon dreifachverglaste Scheiben durch niedrigere g-Werte aus als zweifachverglaste Scheiben und verfügen auch über niedrigere Wärmedurchgangskoeffizienten, die sich auch positiv auf das winterliche Raumverhalten auswirken. Ost- und westorientierte Fenster haben im Sommer auch höhere solare Einträge als süd- und natürlich nordorientierte Fenster und sind durch die niedrig einfallende Sonne am Vormittag und Nachmittag schwieriger mittels Sonnenschutz zu beschatten. Als logische Konsequenz ergibt sich eine Methode, die sich auch das Passivhaus zu Nutze macht: Den Hauptanteil der transparenten Hülle möglichst im Süden anzuordnen, da sie hier hinsichtlich übermäßigen solaren Einträgen leichter handzuhaben ist. Richtig bemessener fixer Sonnenschutz über südorientierten Fenstern (z. B. auskragende Balkonplatte o. ä.) lässt dabei im Winter gewünschte solare Einträge zu, im Sommer werden diese unterbunden. In jedem Fall sind für behagliches Innenraumklima für alle transparenten Flächen Sonnenschutzmaßnahmen vorzusehen, wobei (hinterlüfteter) außenliegender Sonnenschutz (Raffstore, Jalousien, Rolläden, Fassadenmarkisen, etc.) die größte Wirkung zeigt. Ist nur innenliegender Sonnenschutz möglich, so ist auf hohen Reflexions- und niedrigen Absorptionsgrad zu achten. Bereits in früher Planungsphase durchdacht integrierter fixer oder auch mobiler Sonnenschutz erlaubt eine gestalterisch ansprechende Lösung – nachträglich angebrachte Notmaßnahmen führen meist zu Widersprüchen zur ursprünglichen Architektur des Gebäudes. Die Bauart der Verschattungseinrichtungen muss deren bestimmungsgemäßen Einsatz auch bei Wind garantieren. Maßloses Ersetzen opaker Bauteilflächen durch transparente Fassadenflächen, wie es in der zeitgenössischen Architektur gerne gehandhabt wird, ist nicht nur aus Gründen des sommerlichen Wärmeschutzes zu hinterfragen.

Die Planung ausreichender (natürlicher) Lüftungsmöglichkeiten ist auch ein wichtiger Aspekt, damit in der Nacht, sobald die Außentemperaturen unter den Innenraumtemperaturen liegen, überschüssige Wärme effektiv abgeführt werden kann. Dabei erweist sich die Planung von Querlüftungsmöglichkeiten als besonders wirksam. Insekten- oder Pollenschutzgitter reduzieren jedoch wiederum den Luftvolumenstrom durch die jeweiligen Öffnungen. Einbruch- und Schallschutz verhindern auch oft geeignete (natürliche) Lüftungsmöglichkeiten. Hinsichtlich mechanischen Lüftungsanlagen ist anzumerken, dass (energieeffiziente) Lüftungsanlagen für eine nutzbringende Nachtabkühlung im Sommer nicht ausreichend sind. In solchen Fällen kann Bauteilaktivierung, z. B. durch gekühlte Decken, Abhilfe schaffen. Klimageräte sind

derzeit keine (ökologische) Alternative, da durchschnittliche Haushaltsgeräte etwa 2000 W elektrische Leistung benötigen um lediglich einen Raum zu kühlen.

Die Konstruktionsweise der raumumschließenden Bauteile hat – wie in der Arbeit einführend beschrieben – Einfluss auf den sommerlichen Wärmeschutz. Bauteile mit hoher wirksamer Speicherfähigkeit an der Innenseite und dabei gleichzeitig guter Wärmedämmung an der Außenseite führen im Hochsommer zu besten klimatischen Bedingungen im Innenraum (sofern die gespeicherte Wärme durch entsprechende Lüftungsmaßnahmen abgeführt werden kann). Dies ergibt sich durch die Dämpfung der operativen Temperaturamplituden im Tagesverlauf, sprich Temperaturmaxima werden gesenkt. Im (Holz-)Leichtbau kann durch entsprechende Bepunktungen oder Putze (z. B. Lehm) die effektive Speicherfähigkeit (für die 24 h Periode) erhöht werden, was sich positiv auf das Raumklima auswirkt. (Hinterdämmte) Vorsatzschalen, Installationsebenen, abgehängte Decken, etc. können die effektive Speicherfähigkeit von massiven Bauteilen wiederum sehr verringern. Vor allem massive Bodenaufbauten (hohe effektive Speicherfähigkeit), aber auch massive Innenwände tragen zu höherer speicherwirksamer Masse bei und reduzieren Temperaturspitzen. Kompakte Gebäude mit möglichst wenig Außenflächen verhalten sich im Sommer auch besser als Gebäude mit hohen charakteristischen Längen. Helle Fassadenflächen absorbieren bei weitem weniger Wärme als dunkle Fassadenflächen – vor allem bei nicht hochwärmedämmten Bauteilen wird dieser Effekt auch für den Innenraum bemerkbar.

Bezüglich des Wärmedämmstandards lässt sich folgende Erkenntnis bilden: grundsätzlich kann bei niedrigen Wärmedurchgangskoeffizienten der Außenbauteile Wärme in geringeren Maßen vom heißen Außenraum in den Innenraum gelangen, jedoch umgekehrt auch überschüssige Wärme im Innenraum schlechter nach außen entweichen (bei gegebenem Wärmestrom nach außen). Bei hohen Wärmeschutzstandards wird dementsprechend auch eine Abführung erhöhter Raumwärme durch (Nacht-)Lüftungsmaßnahmen von größerer Relevanz.

In der Regel tendieren kleinere Räume (mit großen Fensterflächen) eher zur Überhitzung als Räume mit größerem Volumen. Wie sich diese Maßnahmen jedoch quantitativ auf den Verlauf der operativen Raumtemperatur auswirken ist nur mittels geeigneter thermisch dynamischer Gebäudesimulationsprogramme zu ermitteln – und um diese Methodik auf einfachste Weise ArchitektInnen zur Verfügung zu stellen, bedarf es eines Werkzeuges.

## 6.2 Entwicklung eines Werkzeuges für Planung und Nachweis

Das in Österreich überwiegend eingesetzte, vereinfachte Normverfahren führt zu keiner ausreichenden Planungssicherheit und ist somit von realistischeren Ergebnissen und Möglichkeiten thermischer Gebäudesimulationsprogramme weit entfernt. Gebäudesimulationsprogramme sind aber in der Regel zu komplex und aufwändig, um ArchitektInnen beim Entwurfsprozess zu unterstützen. Ziel ist es, ein allgemein zugängliches, intuitives Online-Tool mit einer selbsterklärenden, spielerisch zu handhabenden Programmoberfläche zu entwickeln, welches mit keinem Mehraufwand gegenüber einem vereinfachten Verfahren verbunden ist, jedoch zu realitätsnahen Ergebnissen führt. Den ArchitektInnen wird es so auf einfache Weise ermöglicht, hinsichtlich des sommerlichen Gebäudeverhaltens einen optimierten Entwurf zu entwickeln und die Sommerauglichkeit nachzuweisen. Im Hintergrund werden bauphysikalisch korrekte Ergebnisse anhand einer thermisch dynamischen Gebäudesimulation erzeugt.

Auf dem Weg der Entwicklung bis hin zur Fertigstellung eines geeigneten Tools sind verschiedene Ansätze verfolgt worden und mussten in späterer Folge teilweise wieder verworfen werden. Nach den hoch angesetzten Anforderungen an das Tool werden vor der Beschreibung des Werkzeuges selbst auch die angesprochenen Ansätze und Vorarbeiten in diesem Kapitel geschildert.

### 6.2.1 Anforderungen

Folgende Auflistung erläutert die wichtigsten Anforderungen an das Werkzeug.

**Einfache und intuitive Benutzung.** Die Benutzeroberfläche soll visuell ansprechend sein, ArchitektInnen und PlanerInnen sollen sich zudem in gewohnter Arbeitsumgebung fühlen, das Erscheinungsbild soll nicht typischer, meist veraltet wirkender, technischer Software entsprechen. Das Erstellen von dreidimensionaler Raumgeometrie, als auch eine Änderung des erstellten Volumens soll auf einfachste Weise erfolgen, um verschiedene Varianten prüfen zu können. Ziel ist es, die Benutzerfreundlichkeit und Intuitivität soweit zu treiben, dass der Erhalt von Ergebnissen nicht wie bei komplexen Simulationsprogrammen das Lesen umfangreicher Handbücher, tiefergehendes bauphysikalisches Wissen und Erfahrung mit dem Programm selbst voraussetzt. Funktionen und Bearbeitungsmöglichkeiten sollen sich an Stellen finden, wo man

es intuitiv erwartet. Unter gegebenen Randbedingungen kann so spielerisch ein optimierter Entwurf hinsichtlich sommerlichen Wärmeschutzes entwickelt werden.

**Erreichbarkeit aller Zielgruppen.** Nicht nur planungsbefähigten Personen wie ArchitektInnen, IngenieurInnen und BaumeisterInnen, auch den in Österreich sehr verbreiteten privaten „HäuslbauerInnen“ soll ein einfacher Zugang zu dem Tool und damit verständlicher Bauphysik ermöglicht werden. Speziell das für technische Software oft gängige komplizierte Installationsverfahren, meist durch Kopier- und Lizenzschutzmaßnahmen bedingt, soll vermieden werden.

**Keine kommerziellen Programme.** Den BenutzerInnen soll ein freier Zugang zu dem Tool ermöglicht werden. Nur einfacher und freier Zugang führen zu einer weitverbreiteten Nutzung.

**Betriebssystemunabhängigkeit.** Viele Planungs- und Simulationsprogramme sind für spezielle Betriebssysteme entwickelt worden, in erster Linie für Microsoft Windows. Das Tool soll betriebssystemunabhängig auf Windows, MacOS sowie auf Linux Distributionen benützlich sein.

**Unabhängigkeit von anderen Programmen.** Mit dem Tool soll sowohl die Geometrieerzeugung als auch die Zuweisung jeglicher Bauteilaufbauten, Nutzungsinformationen etc. an einer Stelle erfolgen um dadurch eine immer aufrechtbestehende Verknüpfung zu gewährleisten. Einige Simulationsprogramme sind den Weg gegangen, das 3D-Geometriemodell mit existierenden 3D-Programmen zu erzeugen (z. B. SketchUp). Das 3D-Modell kann dann in die Simulationssoftware importiert werden und die Elemente können mit weiterer Information versehen werden. Sobald es spätere Änderungen an der Geometrie gibt, beginnt die Problematik von zeitaufwändigem Datenabgleich und damit auch Fehleranfälligkeit.

**Fehleranfälligkeit minimieren.** Soweit möglich sollen den BenutzerInnen Eingaben erspart bleiben, um Fehler zu verhindern. Vor allem die sonst aufwändige und fehleranfällige Eingabe von Flächenangaben, Orientierungen und Neigungen, Angaben von Randbedingungen, Nutzungsangaben etc. soll erleichtert werden. Änderungen wie beispielsweise jene des Standorts, der Ausrichtung, spezieller Nutzungen, Fensterlüftungen, Verschattungen etc. sollen den BenutzerInnen jeweils visualisiert hervor gehoben werden und nicht in versteckten Sub-Sub-Menüs angeordnet sein – ein weiteres wichtiges Kriterium um Fehlerquellen zu verhindern.



**Ergebnisse in Echtzeit.** Die Ergebnisse sollen unverzüglich nach Start der Berechnung erhalten werden. Erst dadurch wird ermöglicht, dass mit geringem Zeitaufwand verschiedene Varianten analysiert werden können.

**Trennung Benutzeroberfläche und Simulationskern.** Da das Programm auf einen bewährten Rechenkern (Geba) zugreifen soll, ist eine komplette Trennung zwischen Benutzeroberfläche und Rechenkern sinnvoll. Als beste Lösung bietet sich als Schnittstelle ein Webservice (siehe Kapitel 6.2.4.4) an, welches unabhängig auf einem Server installiert wird und auf Basis von Geometrie-, Material- und Nutzungseingabeinformation Simulationsergebnisse liefert. Dieses Webservice kann so theoretisch auch anderen Clients das Berechnungsservice zur Verfügung stellen.

Die ersten Ansätze als auch konkrete erste Umsetzungen (siehe Abschnitt 6.2.2) konnten noch nicht alle diese Anforderungen erfüllen. Erst die endgültige Entwicklung entspricht aufgrund der Umsetzung als Web-Applikation diesem Ideal.

Die Anforderung an die Programmfunktionalität lässt sich folgend in groben Zügen umschreiben: Die Oberfläche muss die Möglichkeit bieten, den Standort, bzw. die geografische Position des Gebäudes festlegen zu können, über die das Tool wiederum die Normaußentemperatur ermittelt<sup>1</sup>. Die eigentliche Hauptaufgabe der Programmoberfläche ist die Erstellung eines (hinsichtlich sommerlicher Überwärmung kritischen) Raumes, wobei es von großer Bedeutung ist, dass man später einfach Änderungen an der Geometrie vornehmen kann: Vergrößern und verkleinern des Raumes durch Verschieben von Bauteilen. Auch das Editieren der Fensterdimensionen ist eine wichtige Anforderung. Durch diese Veränderungen kann der Planer dann beinahe spielerisch nach jeder Änderung die Auswirkungen auf die operative Raumtemperatur im Sommer prüfen und den Entwurf dementsprechend optimieren. Ein Raum muss nicht zwingend ein Quader sein, er kann jede beliebige polygonale Form<sup>2</sup> annehmen. Jeder Bauteil bekommt somit eine Orientierung und eine Neigung. Vor allem für innerstädtische Bereiche mit vielen Dachgeschoßwohnungen bzw.-räumen scheint die Modellierung verschiedener Dachformen als weitere wichtige Anforderung. Bauteilen wie Wänden und Decken/Fußböden müssen Aufbauten zugewiesen werden können. Bauteilaufbauten bestehen in der Regel aus mehre-

---

<sup>1</sup>Die automatische Ermittlung der Normaußentemperatur ist vorerst nur für österreichische Standorte möglich. Optional sollen nötige Eingabefelder für weltweite Standorte angeboten werden.

<sup>2</sup>Rundungen wurden als nicht vorrangig eingestuft und können vorerst nur durch Abtreppung angenähert werden.

ren Materialschichten. Materialien sind wiederum durch Eigenschaften wie Rohdichte, Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität zu kennzeichnen. Zumindest eine Bauteilschicht pro Konstruktion soll inhomogen sein dürfen, um beispielsweise Holzständer in einer Holzrahmenkonstruktion abbilden zu können. Materialien und Glaseigenschaften können aus einer Bibliothek abgerufen und einfach zugewiesen oder aber auch neu erstellt werden. Grundsätzlich muss für jeden Bauteil festgelegt werden, ob es sich um einen Innenbauteil, einen Außenbauteil oder einen erdbodenberührten Bauteil handelt. In der grafischen Darstellung des entsprechenden Bauteils sollte diese Festlegung durch die Farbe erkenntlich werden (z. B. Innenbauteil = gelb, erdbodenberührter Bauteil = braun). Lüftung, interne Wärmelasten und auch Verschattung oder natürliche Lüftung der Fenster können spezifiziert werden und Zeitverläufe können diesen zugewiesen werden. Zeitverläufe sind 24 Werte, die zu jeder vollen Stunde des Tages einen Wert zu der entsprechenden Datenart liefern. Es gibt vorgefertigte Zeitverläufe wie beispielsweise Tagesnutzung oder Nachtnutzung aus der Bibliothek, man soll jedoch auch Zeitverläufe selbst anlegen können. Sobald geografische Lage, Raumgeometrie, Bauteilaufbauten, Fenstereigenschaften und optional interne Wärmelasten, Lüftung und Verschattung (mit jeweiligem Zeitverlauf) festgelegt wurden, kann durch Anwählen einer Schaltfläche die Berechnung gestartet werden. Damit wird die Verbindung zu einem Webservice auf einem entfernten Server<sup>3</sup> aufgebaut und die gesammelten Informationen strukturiert übertragen, worauf das Webservice nach Berechnung dem Tool Ergebnisse zurücksendet. Diese sollen in Diagrammform dargestellt werden.

### 6.2.2 Ansätze und Vorarbeiten

Auf dem Weg zur Umsetzung eines Werkzeuges, das den gewünschten Anforderungen gerecht wird, sind unterschiedliche Ansätze verfolgt worden – bis hin zu einer funktionstüchtigen Implementierung als Java Applet (siehe Abschnitt 6.2.2.3). Aus Dokumentationsgründen soll hier kurz auf die einzelnen Herangehensweisen eingegangen werden. Zudem wird erläutert, warum diese zum Teil wieder verworfen wurden und wie diese Erfahrungen in das endgültige Tool *Thesim3D* eingeflossen sind. *Thesim3D* wird ab Kapitel 6.2.4 beschrieben.

---

<sup>3</sup>Server: Diener, Dienstleister (lat.); 1. und allgemein: Objekt, das einem anderen Objekt Dienste offeriert [...] 2. Dienstleistungsprogramm und/oder Datenbestand in einem Netzwerk, die von mehreren Teilnehmern benutzt werden können [...] [26]

### 6.2.2.1 SketchUp Extension

SketchUp [119] ist ein Programm zur einfachen und schnellen Erstellung von digitalen 3D-Modellen, worauf auch schon die Namensgebung hinweist<sup>4</sup>. Unter ArchitektInnen ist es ein beliebtes und gängiges Tool zur Entwurfsunterstützung. Die intuitive Handhabung erlaubt auch eine Benutzung ohne „Computer Aided Design“ (CAD) -Kenntnisse.

Das Programm wurde im Jahr 2000 von der Firma Last Software vorrangig für den Architekturbereich entwickelt. 2006 kaufte Google die Software, da sie sich sehr gut zum effizienten Erstellen von Gebäudemodellen für Google Earth eignet. Bis heute gibt es aus diesem Grund eine kostenfreie Version des Programms. 2012 wurde SketchUp an Trimble Navigation verkauft, weil Google von nun an Photogrammetrie für die 3D-Erstellung nützte [80]. Die aktuelle Version lautet SketchUp 2016, die kostenlose Version nennt sich seit 2012 SketchUp Make.

Aufgrund der einfachen Handhabung erschien es in erster Überlegung sinnvoll, die Geometrieerzeugung oder -definition, die in der Regel bei der Raum- oder Gebäudesimulation einen großen Teil des Arbeitsaufwandes einnimmt, mit SketchUp durchzuführen. Viele größere Softwareprojekte erlauben es, den Funktionsumfang durch sogenannte Plugins oder Extensions zu erweitern. Auch SketchUp bietet diese Möglichkeit in Form von Ruby Plugins. Ruby ist eine Skriptsprache für schnelle und einfache objektorientierte Programmierung und eine Sprache, die SketchUp über das SketchUp Ruby „Application Programming Interface“ (API) versteht. ProgrammiererInnen oder EDV-versierte SketchUp BenutzerInnen können so über eine selbst erstellte Ruby Extension, die sich aus einer beliebigen Anzahl von Ruby Skripts zusammensetzt, über die Programmierschnittstelle (API) Funktionen automatisieren oder weitere hinzufügen.

Nach Einarbeitung in die Programmiersprache Ruby und das API konnte grundsätzlich bestätigt werden, dass eine Umsetzung des gewünschten Vorhabens möglich ist. Über den von dem API zur Verfügung gestellten „WebDialog“ ist die Implementierung zusätzlicher Benutzeroberflächen, als auch eine Schnittstelle zu einem Webservice zum Erhalt der Ergebnisse möglich. SketchUp bietet zwar die Möglichkeit, Verschattung (auf Basis von geografischer Position und Uhrzeit) zu nutzen, jedoch kann man auf die interessierende verschattete Bauteilfläche nicht über das API zugreifen, da die Verschattungsberechnung aus Geschwindigkeitsgründen direkt auf Grafikprozessorebene stattfindet. Zur Einarbeitung wurde deshalb eine vereinfachte vektorbasierte Verschattungsberechnung als Ruby Skript implementiert. Zur Über-

---

<sup>4</sup>Sketch: engl.: Entwurf, Skizze.

prüfung der Sonnengangvektoren, die SketchUp generiert, wurde ein stündlicher Vergleich zur Tag- und Nachtgleiche, zur Sommersonnenwende und zur Wintersonnenwende mit den Ergebnissen von dem Programm SolRad [61] erstellt. Die maximale Abweichung ergibt sich bei der Tag- und Nachtgleiche bei  $0,38^\circ$  bezüglich Azimut und  $0,42^\circ$  bezüglich Sonnenhöhe. Die Daten und Quellcodes finden sich im digitalen Anhang dieser Arbeit (siehe Anhang D).

Die Umsetzung des Vorhabens der Integration in SketchUp wurde aus folgenden Gründen Mitte des Jahres 2013 eingestellt: Aufgrund des Verkaufes von Google SketchUp an Trimble Navigation Mitte 2012 war die Zukunft des Programms zu diesem Zeitpunkt nicht vorherzusehen – sollte die kostenlose Version eingestellt werden<sup>5</sup>, ist auch die weitere Nutzung des Programms für die Entwurfsprozesse der ArchitektInnen fraglich. Die Anforderung, dass es keinen Installationsprozess benötigt und auch die Betriebssystemunabhängigkeit ist nicht gegeben. Zudem wurde zu diesem Zeitpunkt die Idee geboren, die Funktionalität in ein Programm zu integrieren, das ArchitektInnen ohnehin zum Erstellen von Plänen verwenden.

#### 6.2.2.2 Revit Add-On

Revit [2] ist eine Planungssoftware von Autodesk für ArchitektInnen, GebäudetechnikerInnen und TragwerksplanerInnen. Revit arbeitet objektorientiert und unterstützt die neue Technologie „Building Information Modeling“ (BIM). Der Begriff BIM bedeutet Gebäudedatenmodellierung und ist eine Methode der optimierten Planung, Ausführung und Bewirtschaftung von Gebäuden. Dabei werden alle relevanten Gebäudedaten digital erfasst, kombiniert und vernetzt. Änderungen im digitalen 3D-Gebäudemodell wirken sich umgehend auf alle davon abhängigen Ansichten und Schnitte aus. Da FachplanerInnen und andere Beteiligte an selben bzw. abgeleiteten Projektdateien arbeiten, ist auch für sie jede Änderung sofort ersichtlich. Massenlisten, Stückzahlen oder Kosten werden automatisch aktualisiert. BIM reduziert damit erheblich den Koordinierungs- und Arbeitsaufwand. Wie man in den USA erkennen kann, liegt die Zukunft in der Verwendung von BIM. Auch hierzulande wird beispielsweise das BIM Programm Revit zunehmend in Planungsbüros verwendet. Die Europäische Kommission empfiehlt beispielsweise auch, BIM bereits ab 2016 bei Ausschreibungen und Vergaben öffentlicher Bauaufträge zu verwenden.

Revit bietet ebenso ein API an. Diese Schnittstelle ermöglicht auf-

---

<sup>5</sup> Auch zum Zeitpunkt des Abschlusses ist eine kostenlose Version von SketchUp erhältlich.

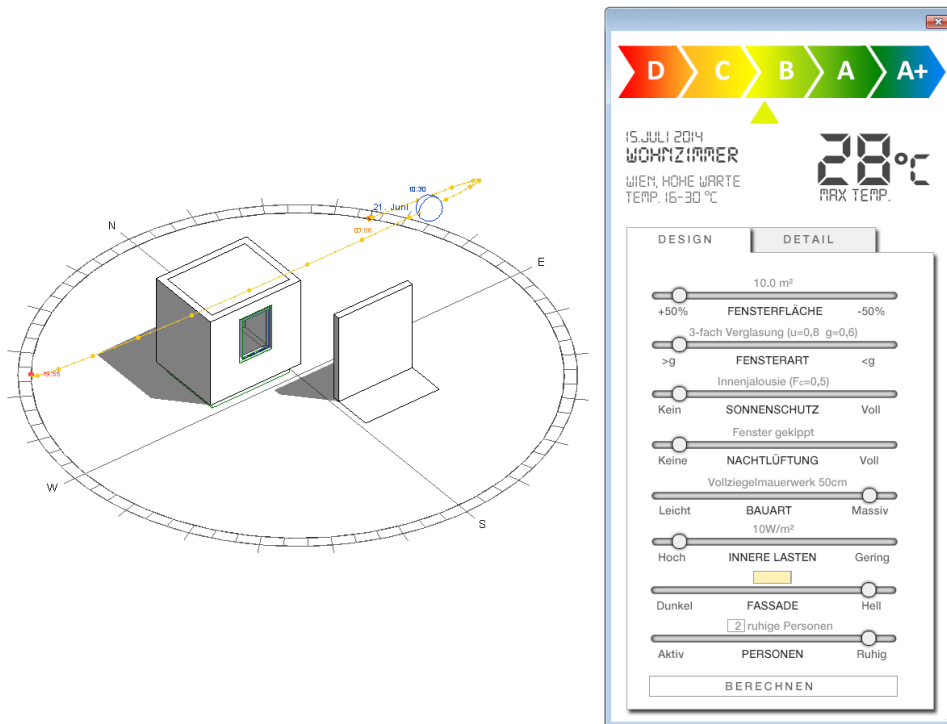


Abbildung 6.1: Versuch eines GUI-Designs als Add-On für Revit.

grund der .NET Technologie und der damit verbundenen, ausgereiften und vollständig objektorientierten Programmiersprachen (C#, C++ oder VB) beinahe unbeschränkte Möglichkeiten in der Add-On Entwicklung. Bei der Programmierung in SketchUp ist man hingegen auf die Skriptsprache Ruby beschränkt. Abbildung 6.1 zeigt einen Versuch eines „Graphical User Interface“ (GUI) Designs als Add-On für die BIM-Software Revit mit dem Ansatz zu einem spielerischen Umgang mit Parametern von großem Einfluss auf die operative Raumtemperatur.

Nach intensiver Beschäftigung mit dem API von Revit ergaben sich neue Erkenntnisse. Zwar kann mit dem API tatsächlich wie geplant auf alle gewünschten Programmteile von Revit zugegriffen werden<sup>6</sup>, es zeigten sich jedoch neben der lizenz- und damit kostenpflichtigen Nutzbarkeit von Revit weitere Unstimmigkeiten hinsichtlich der Anforderungen an das zu entwickelnde Tool. Hauptproblem stellt die Benutzerunfreundlichkeit der Oberfläche dar: Revit besitzt bereits die Möglichkeit, für Bauteile thermische Eigenschaften zu hinterlegen, die aus Schnitt-

<sup>6</sup>Wie bei dem SketchUp API hat man jedoch auch bei dem Revit API keinen Zugriff auf Daten bezüglich der Verschattung von Elementen.

stellengründen auch an dieser und nicht anderer Stelle parallel hinterlegt werden sollten. Da dies aber nicht für den täglichen Gebrauch von Revit benötigt wird, müssen die BenutzerInnen dies relativ „versteckt“ aktivieren und die Bearbeitung der Daten sind ebenso an umständlich zu erreichenden Positionen. Auch die Behandlung von bauphysikalischen Fensterparametern ist vom System nicht für die gewünschte Genauigkeit der Berechnungen vorgesehen und müsste in eigenen Dialogen eingetragen werden, was die Logik und die Benutzerfreundlichkeit zu einem Punkt bringt, wo es keine Verbesserung zu herkömmlichen Systemen geben würde.

Da die Anforderungen an die Benutzerfreundlichkeit des entwickelten Werkzeuges jedoch sehr hoch gesteckt wurden, darf auf so einen Kompromiss nicht eingegangen werden. Ein weiterer – vorerst vernachlässigter – Grund für diese Entscheidung ist im Umstand begründet, dass der Kreis der BenutzerInnen auf Personen, die eine gültige (kostenpflichtige) Lizenz von Revit halten und zudem im Umgang mit dieser eher komplexen BIM Software vertraut sind, beschränkt ist. Die Zielgruppe der Entwicklung wird damit drastisch verkleinert. Zudem würde die Option keine Betriebssystemabhängigkeit erlauben – MacOS und Linux BenutzerInnen könnten von dem zu entwickelnden Tool nicht profitieren. Der Nachteil der umständlichen Benutzbarkeit wiegt schwerer als der Vorteil des BIM-Konzepts, weshalb von der Integration in Revit abgesehen und eine andere Entwicklungsrichtung eingeschlagen wurde.

### 6.2.2.3 Java Applet

Aus den Erkenntnissen der ersten Herangehensweisen musste wieder ein Schritt in der Entwicklung des Programms zurückgegangen werden, um auf die ursprünglich wesentlichen und wichtigen Werte einzugehen: Einfachste und intuitive Benutzbarkeit, Erreichbarkeit jeder Zielgruppe, Betriebssystemunabhängigkeit sowie Verzicht auf kommerzielle Programme (vgl. Abschnitt 6.2.1). Diese Anforderungen würden sich am ehesten mit einer browserbasierten Webapplikation erfüllen lassen. Um den Programmieraufwand in Grenzen halten zu können, wurde das Angebot an Open-Source<sup>7</sup> Entwicklungen hinsichtlich 2D/3D-Raumerstellung umfassend recherchiert, um ein Programmpaket ausfindig zu machen, auf dem aufgebaut werden kann. Mit SweetHome3D [102] wurde eine Software gefunden, die in Grundzügen bereits den Anforderungen entspricht.

---

<sup>7</sup>Grundsätzlich Software, deren Quellcode frei zugänglich ist und die beliebig kopiert, genutzt und verändert werden darf. Es gibt jedoch eine Reihe von Open-Source-Lizenzen, die diese Befugnisse teilweise wieder einschränken.

SweetHome3D ist eine Open-Source Entwicklung eines 2D/3D-Innenraumplaners, welche seit dem Jahr 2006 laufend erweitert wird. Die Absicht ist es, durch Aufsetzen auf diese Software Zeitersparnis hinsichtlich aufwändiger 2D/3D-Grafikprogrammierung (Geometrieerzeugung) zu gewinnen. Aufgrund des Vorliegens der gesamten Quellcodes können alle Änderungen und gewünschten Erweiterungen integriert werden. Das Programm ist in der objektorientierten Programmiersprache Java umgesetzt und wird grundsätzlich als Java-Desktop-Applikation angeboten. Innerhalb der Anwendung wird die Klassenbibliothek Java3D zur Erzeugung, Manipulation und Darstellung dreidimensionaler Grafiken genutzt. Der Quellcode kann jedoch auch als Java Applet<sup>8</sup> kompiliert werden, was dazu führt, dass er über eine Webseite ausgeführt werden kann. Somit sind die gewünschten Anforderungen erfüllbar: Durch Umprogrammieren der Oberfläche kann die intuitive Benutzbarkeit geschaffen werden. Durch die Ausführbarkeit in einem Browser (Internet) wird das Programm jedem zugänglich, unabhängig von Betriebssystem als auch von kommerzieller Software.

Die mehrjährige Entwicklungsgeschichte von SweetHome3D führt dazu, dass die Software bereits sehr umfangreich und komplex ist. Viele Funktionalitäten sind für den Gebrauch des zu entwickelnden Tools irrelevant, jedoch fehlen an anderer Stelle wichtige Eigenschaften, um das System zu einem Simulationstool mit gewünschten Anforderungen zu erweitern.

Die Umsetzung bis hin zu einem funktionstüchtigen Simulationstool wurde im Zuge dieser Arbeit ein Jahr lang ab September 2014 durchgeführt. Als sehr problematisches Ereignis erwies sich, dass die grundlegende Schnittstelle zum Ausführen von Java Applets, NPAPI<sup>9</sup>, in dem am häufigst verwendeten Browser Google Chrome<sup>10</sup> im September 2015 deaktiviert wurde. Auch Mozilla kündigte wenig später an, bis Ende 2016 die NPAPI-Unterstützung komplett aus Firefox entfernen zu wollen. Grund für diese Entwicklungen sind Sicherheitsprobleme: nicht wohlgesinnte Entwickler können Applets dazu nutzen, Schaden an anderen Computern anzurichten.

Aufgrund dieser Entwicklungen kann das Tool nicht mehr den gesetzten Anforderungen gerecht bleiben (einfache, installationsfreie, betriebssystemübergreifende Lösung). Es könnte zwar mit überschauba-

---

<sup>8</sup> Applets sind in der Programmiersprache Java umgesetzte Programme. Sie können nicht eigenständig als Programm aufgerufen werden, sondern werden über eine HTML-Seite von einem lokalen Rechner, vom Internet oder von einem firmeneigenen Intranet geladen und in einem Browser auf dem lokalen Rechner ausgeführt [35].

<sup>9</sup> NPAPI steht für Netscape Plugin API und wird von Browsern dazu verwendet, Plugins wie Java Applets einzubinden.

<sup>10</sup> Statistik Mai 2016: Chrome 71,4 %, IE 5,7 %, Firefox 16,9 %, Safari 3,6 % [121]

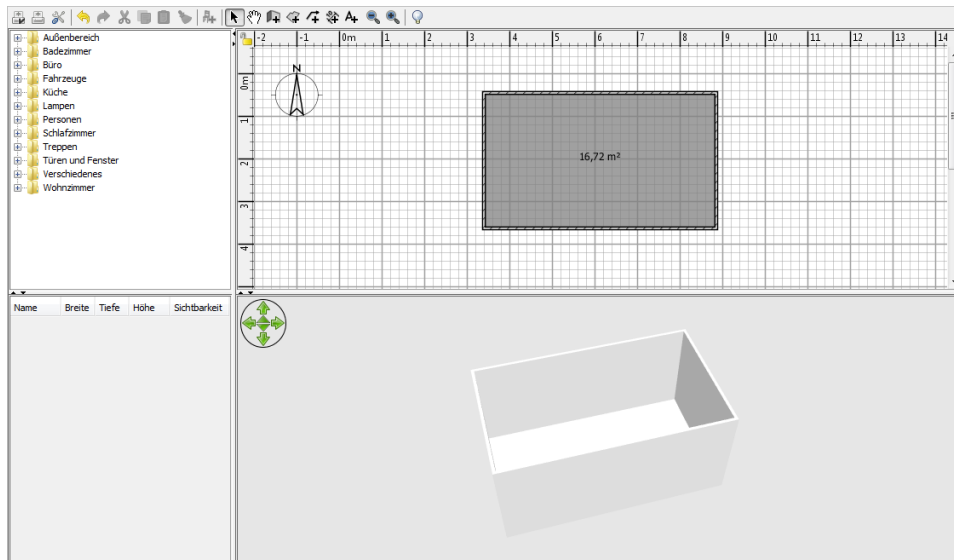


Abbildung 6.2: Originalzustand SweetHome3D.

rem Programmieraufwand in eine Java-Desktop-Applikation umgewandelt werden, eine Ausführung über einen Browser ist damit jedoch nicht mehr möglich. Es musste somit auch dieser Entwicklungszweig abgebrochen und eine zukunftsfähige Technologie gefunden werden, die eine Umsetzung in ähnlichem Stil erlaubt (siehe Abschnitt 6.2.4). Da die Einarbeitung, Änderungen und Erweiterungen in das komplexe Open-Source-Projekt jedoch ein langwieriges Unterfangen war, soll an dieser Stelle trotz des schlussendlichen Verwerfens kurz darüber berichtet werden. Die endgültige Umsetzung des Tools in zukunftsfähiger Technologie wird ab Kapitel 6.2.4 beschrieben, wo bei Überspringen der folgenden Dokumentation direkt fortgesetzt werden kann.

Abbildung 6.2 zeigt die Programmoberfläche im SweetHome3D Originalzustand. Die Programmoberfläche ist grundsätzlich in vier Abschnitte geteilt. Oben befindet sich linker Hand eine Bibliothek mit einer großen Zahl von Einrichtungsgegenständen, rechter Hand befindet sich das Hauptfenster, in welchem der Raum zweidimensional erstellt wird. Im unteren Bereich befindet sich links eine aktuelle Liste mit Einrichtungsgegenständen im erstellten Modell und rechts ein Kontrollbereich, der jede Änderung des 2D-Bereiches dreidimensional widerspiegelt, Rotieren und Zoomen zulässt, jedoch keine Auswahl von Elementen. Die 2D-Raumgeometrie kann einfach erstellt werden, indem wie mit einem Polygon-Werkzeug (Wand-Tool) pro Klick ein Polygonpunkt hinzukommt. Ist das Polygon geschlossen, so wird der Raum inklusive Flächenanzeige automatisch erstellt. Aufgrund des Zweckes



als Einrichtungstool bleibt der Raum für eine Einsicht nach oben hin offen. Einrichtungsgegenstände können nach Raumerstellung der 2D-Fläche hinzugefügt werden.

Abbildung 6.3 zeigt einen Ausschnitt der bestehenden Klassenstruktur von SweetHome3D, die das Modell beschreiben. Um eine klare Trennung zu dem Originalprojekt beizubehalten und so parallele Weiterentwicklungen des Projektes auch zu späterem Zeitpunkt nutzen zu können, wurden Änderungen und Erweiterungen nicht direkt in den bestehenden Quellcode eingetragen, sondern das Konzept der Vererbung genutzt. So wurde zusätzlich zu den neu erstellten Klassen der Großteil der bestehenden Klassen abgeleitet und die benötigten Erweiterungen in diesen Subklassen in einem eigenen Namespace implementiert. Wie die Klassenstruktur des Originalmodells zeigt, besteht das Modell u. a. aus einem oder mehreren Räumen und Wänden. Für eine 3D-Darstellung des Raumes ist das für das Simulationstool zwar keine ideale Abbildung, jedoch kann durch entsprechende Erweiterung ein Großteil von 3D-Raumgeometrien beschrieben werden. Ein Raum impliziert somit eine Fußbodenfläche und umgebende Wände, die durch Anfangs- und Endhöhe spezifiziert sind. Was hinsichtlich der Anforderungen bezüglich Raumerzeugung komplett fehlt, ist die Erstellung von Dachflächen. Um nicht zu sehr ins Detail zu gehen, werden folgend nur die wichtigsten Änderungen und Erweiterungen grob aufgelistet, die zur Nutzung als Simulationstool notwendig waren.

**Dachflächen.** Zwei Möglichkeiten zur Dachflächengenerierung wurden implementiert. Die relevantere wird hier kurz erläutert: Nach Erstellen der Wandfolge zu einem geschlossenen Polygon kann durch Doppelklick mit dem neuen Decken-Tool innerhalb des Polygons automatisch eine Dachfläche erzeugt werden. Als Basis dienen Anfangs- und Endhöhen der Wände, wobei hier durch einen intelligenten Algorithmus je nach Konfiguration mehrere Deckensegmente mit verschiedenen Neigungen und Ausrichtungen generiert werden können. Das automatische Anpassen an Ausrichtung und Orientierung beim Hinzufügen von Fenstern auf Dachflächen musste ebenso implementiert werden, wie die Darstellung im 3D-Bereich.

**Bezugsabmessungen.** Bei der Erstellung des Raumes im Original wird für die Dimensionierung die Zentralachse der Wände verwendet. Für die Berechnung der sommerlichen Überwärmung sind als Bezug jedoch Innenabmessungen notwendig, wodurch das System diesbezüglich umprogrammiert werden musste.

**Benutzeroberfläche.** Die Änderung und Erweiterung der Benutzeroberfläche und der damit verbundenen Logik umfassten grob das

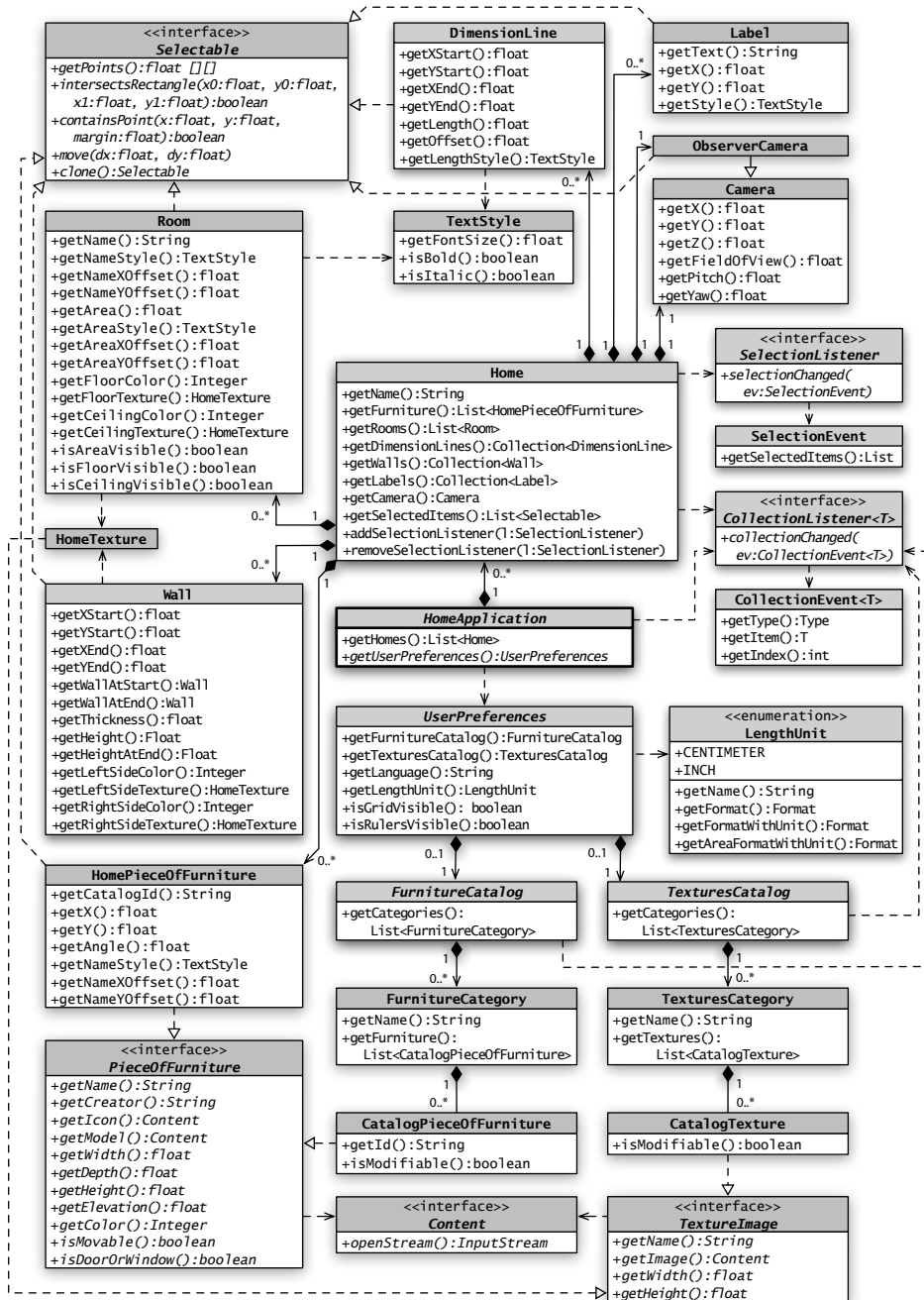


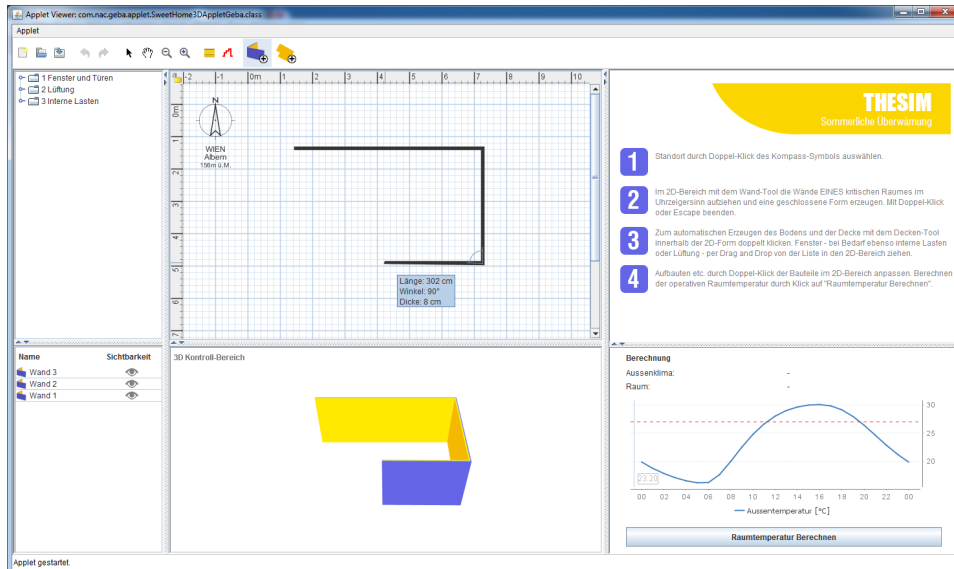
Abbildung 6.3: UML Diagramm mit einem Ausschnitt der wichtigsten Klassen bezüglich des Modells des Originalprojektes SweetHome3D (Namespace com.eteks.sweethome3d.model), © 2008 eTeks [102].

Hinzufügen zweier Hauptabschnitte für Elementinformationen und Simulationsergebnisse (Abb. 6.4-6.7). Zusätzlich musste die vorhandene Liste der Einrichtungsgegenstände zu einer Liste der aktuellen im Modell befindlichen Bauteile abgeändert werden. Die Bibliothek der Einrichtungsgegenstände musste zur Bibliothek für Fenster, Türen, Lüftung und interne Lasten umfunktio- niert werden. Interne Lasten sowie Lüftung können so einfach als 3D-Objekte von der Bibliothek in den Raum gesetzt und damit aktiviert werden. Die nicht vorhandene Bearbeitungsmöglich- keit aller Elemente musste erst implementiert werden. Überdies benötigte es eine Erweiterung des „Kompassmoduls“, um auch den Standort des Gebäudes an einer passenden Stelle im Pro- gramm festlegen zu können. Zusätzliche Erweiterungen wurden durch das Programmieren eines Bauteil- und Materialmanagers, inklusive der grafischen Darstellung der Bauteilaufbauten, so- wie durch Implementieren eines Zeitverlaufmanagers geschaffen. Schlussendlich bedurfte es der Diagrammdarstellung der vom Webservice gelieferten Ergebnisse und der Deaktivierung aller irrelevanten Funktionen des Originals.

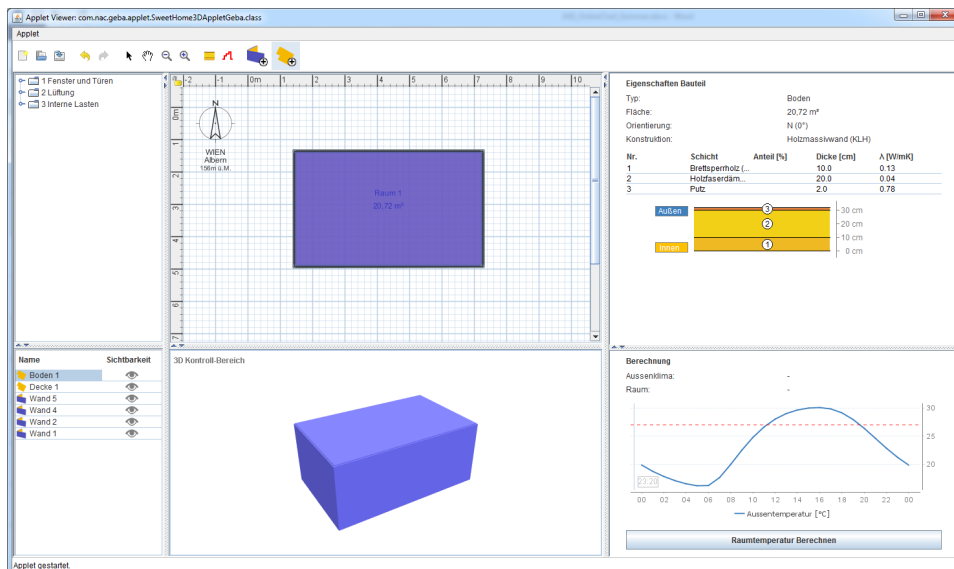
**Schnittstelle zum Webservice.** Implementieren der Logik, dass auf Basis der erzeugten Raumgeometrie, der Bauteilaufbauten, Fen- sterdaten und Nutzungsinformationen für den Geba Rechenkern lesbare Eingabedateien erzeugt werden, sowie die Kommunikati- on mit dem Webservice.

Abbildungen 6.4 bis 6.7 zeigen Screenshots der Umsetzung des Tools als Java Applet. Die System-Architektur lässt sich wie folgt beschrei- ben: Das Programm wird als Java Applet ausgeführt und läuft in einem Webbrowser. Es werden in dem Applet die Raumgeometrie erstellt und die weiteren benötigten Parameter für eine Berechnung spezifiziert. Da- nach kann die Simulation gestartet werden, wobei durch das Applet eine Verbindung zu einem Java Webservice aufgebaut wird. Das Webservice startet die Berechnung auf dem Server, der über die Berechnungspro- gramme von Geba verfügt und liefert entsprechende Simulationsergeb- nisse an den Client, also das Java Applet zurück. Das Java Webservice wurde in Grundzügen bereits für die Kommunikation mit dem Java Applet funktionsfähig umgesetzt, jedoch für die endgültige Lösung um- fangreich erweitert und wird deshalb im Zuge der Beschreibung dieser erläutert (Abschnitt 6.2.4.4).

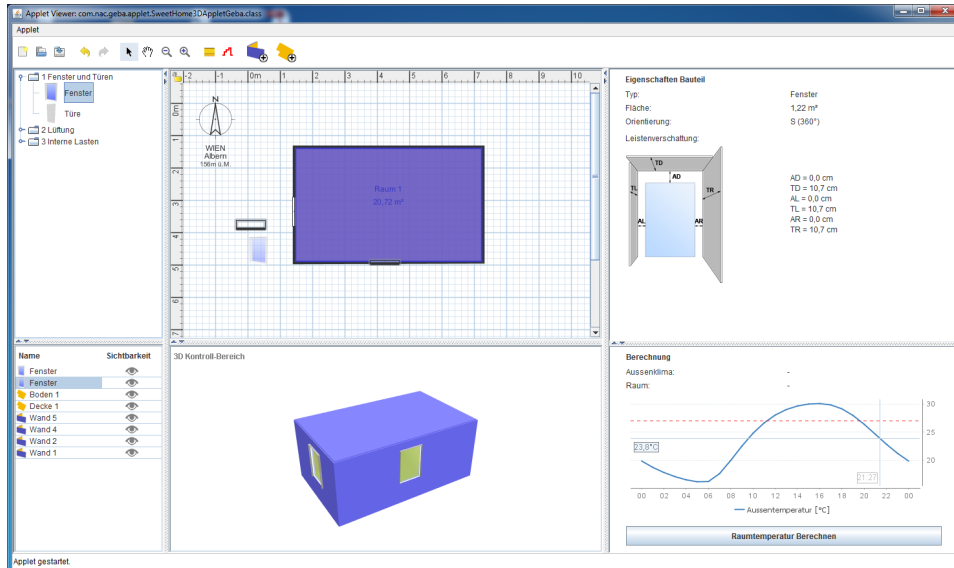
Um die Benutzbarkeit des Tools im Zuge des „Usability Engineering“ (siehe Abschnitt 6.2.7) an einem konkreten Beispiel zu testen, und ggf. Problempunkte aufzeigen zu können, wurde ein Anwendungsfall durch- geführt. Fünf Architektur-StudentInnen wurde die Aufgabe gestellt,



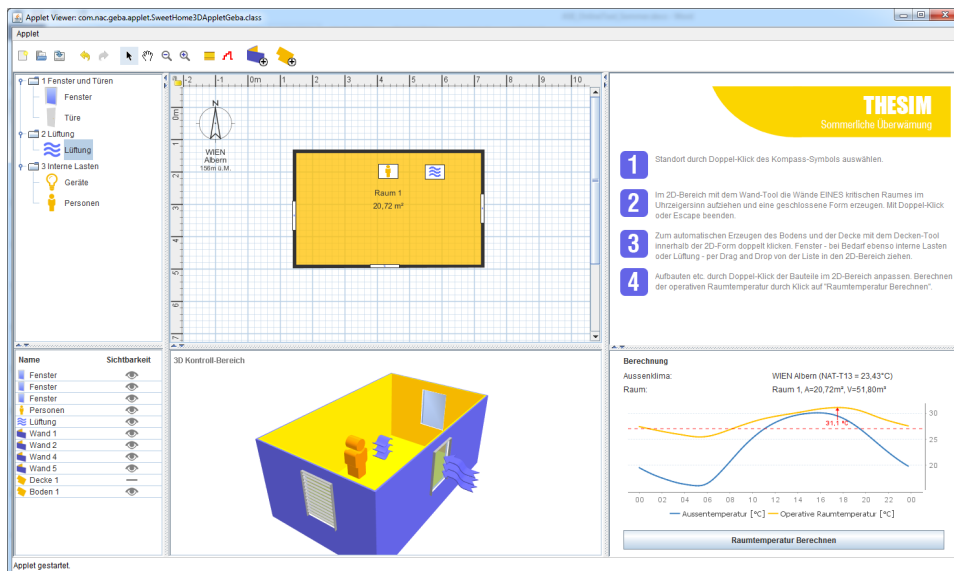
**Abbildung 6.4:** Bereits funktionstüchtiges Java Applet: Nachdem der Standort festgelegt wurde, werden raumbegrenzende Wände im 2D-Bereich aufgezogen, 1:1 ersichtlich im 3D-Kontrollfenster. Innenseiten werden gelb, Außenseiten blau dargestellt.



**Abbildung 6.5:** Boden und Deckenelement werden durch Doppelklick innerhalb der Wandbegrenzung generiert. Aufbauten können folgend den Bauteilen zugewiesen werden.



**Abbildung 6.6:** Fenster können per Drag and Drop aus dem Bibliotheksbereich zu Wand- oder Dachfläche hinzugefügt werden (Snapping der Orientierung und Neigung).



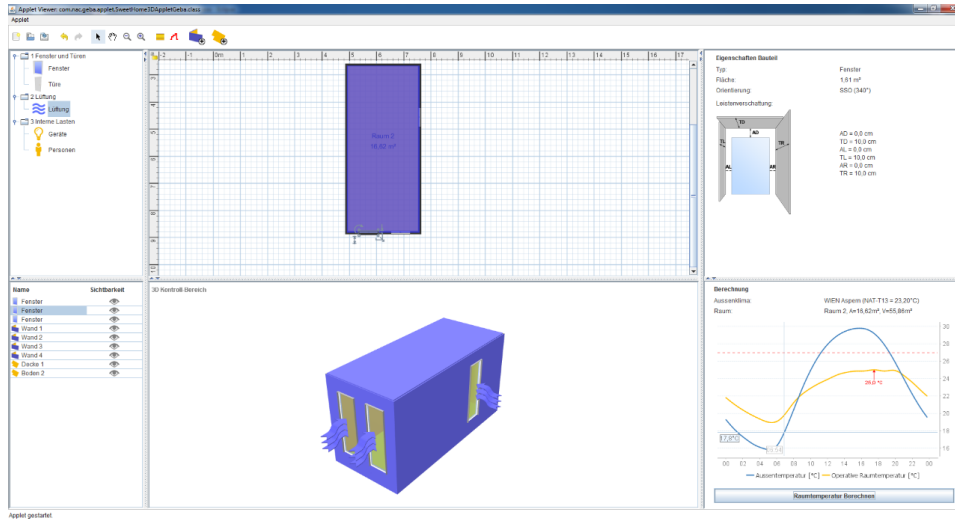
**Abbildung 6.7:** Interne Wärmelasten wie Geräte oder Personen können wieder per Drag and Drop in den Raum gesetzt werden. Auch Lüftungsanlagen können spezifiziert werden oder natürliche Lüftung und Verschattung als Eigenschaften der Fenster. Danach sind alle benötigten Eingaben vorhanden und die sich im Sommer einstellende Raumtemperatur kann berechnet werden.

eine vergleichende Analyse der sich einstellenden sommerlichen operativen Raumtemperaturen zweier Büroräume (kleines Büro im Vergleich zu größerem Open-Office) an zwei verschiedenen Standorten (Wien und Dornbirn) anhand des für sie zuvor unbekanntes Tools durchzuführen. Die vorgegebenen Büroräume befinden sich im südöstlichen Bereich des Gebäudes, sind von Nebengebäuden nicht beschattet und werden damit als kritisch hinsichtlich sommerlicher Überwärmung angesehen. Die definierten Räume weisen immer denselben Wandaufbau kombiniert mit vier verschiedenen Deckensystemen (STB, CLT, CLT-Beton-Verbund, Brettstapelholz-Beton-Verbund) auf, die es im Zuge des durchgeführten Wahlseminars hinsichtlich weiterer Kriterien zu prüfen galt. Die StudentInnen konnten durch diese Aufgabe auch spielerisch erfahren, welche Auswirkungen diverse Änderungen auf den Verlauf der Raumtemperaturen haben. Es wurde bei vorgegebener Geometrie so lange mit den Möglichkeiten der natürlichen Belüftung, des Sonnenschutzes, der Glasart, Nutzung, etc. experimentiert bis ein normgemäß sommertauglicher Raum nachgewiesen werden konnte. Abbildungen 6.8 und 6.9 zeigen Screenshots während des Analyseprozesses. Da es an dieser Stelle vorwiegend um die Usability des Tools geht, wird auf detaillierte Angabe von Aufbauten oder Randbedingungen verzichtet. Der studentische Bericht findet sich jedoch in der digitalen Anlage dieser Arbeit (siehe Anhang D). Die wichtigsten allgemeinen Erkenntnisse, die die Studierenden aus den Analysen gewonnen haben, seien hier kurz zusammengefasst:

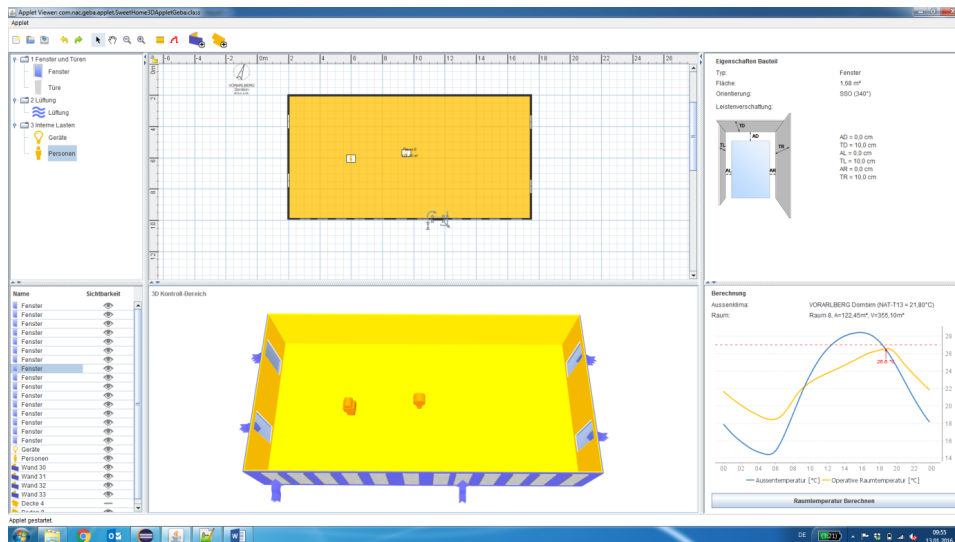
- Bei Standortwechsel von Dornbirn nach Wien, Innere Stadt erhöht sich der Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur gemäß Norm um mehr als 3 K<sup>11</sup>. Ein Raum, der in Dornbirn sommertauglich ist, zeigt am Standort Wien bei gleicher Ausführung in der Regel kräftige Überwärmungstendenz.
- Bei den relativ hohen internen Lasten (Personen und Geräte) der Büros kann eine Sommertauglichkeit ohne spezielle Maßnahmen wie Verschattung der Gläser und Nachtlüftung nicht erreicht werden.
- Die Sommertauglichkeit für den kleineren Büroraum lässt sich schwerer erreichen als für das größervolumige Open-Office.
- Durch Erhöhung der effektiven Speicherfähigkeit der Fußboden- und Deckenkonstruktionen lassen sich Temperaturspitzen im konkreten Fall bis zu 2K senken (CLT geringer als die vergleichbaren STB-CLT-Verbund und STB Aufbauten).

---

<sup>11</sup> Je nach genauer Höhenlage im Ortsgebiet von Dornbirn (404 m-1792 m) kann das noch weitaus mehr sein.



**Abbildung 6.8:** Zwischenschritt bei der Erstellung des Modells für das kleine Büro am Standort Dornbirn. Aufbauten, Fensterdaten und Lüftung wurden bereits bestimmt, jedoch fehlt noch die Angabe der internen Lasten wie Personen und Geräte.



**Abbildung 6.9:** Endgültiges Modell für das Open-Office am Standort Dornbirn. Aufbauten, Fensterdaten, Lüftung und interne Lasten wurden bestimmt und eine Sommertauglichkeit bei dieser Konfiguration nachgewiesen ( $\Theta_{op,max} < 27^\circ\text{C}$ ).

Hinsichtlich der Usability wurde folgende positive Kritik geäußert: *Die Benutzeroberfläche ist sehr logisch und für das Verständnis einfach aufgebaut, somit ist eine schnelle Ergebniserzielung auch für Laien gegeben.* Als zu kompliziert wurden folgende Punkte genannt, die in der endgültigen Fassung des Tools dementsprechend verbessert wurden.

**Änderung der Geometrie.** In dem Tool erfolgt die Änderung der Geometrie durch Interaktion mit der Maus. Sobald ein Objekt selektiert wird, erscheinen Änderungssymbole als Fangpunkte um das Objekt, um z. B. Höhe oder Breite eines Fensters per Klick und Mausbewegung zu verändern. Diese Art der Größenänderung erscheint in der Benutzbarkeit etwas zu kompliziert und bedarf der Übung, weshalb das Konzept in der endgültigen Fassung verändert wurde. Die Fensterdimensionen können dann einfach per Tastatureingabe verändert werden. Die Änderung der Wandhöhe erscheint ebenso zu kompliziert. Da die Erstellung der Geometrie im 2D-Bereich ohnehin etwas eingeschränkt ist und auch schräge Wandflächen oder komplexere Dachformen schwer umsetzbar sind, wird die endgültige Umsetzung eine Erstellung der Raumgeometrie in drei Dimensionen ermöglichen, wodurch die genannten negativen Kritikpunkte beseitigt werden.

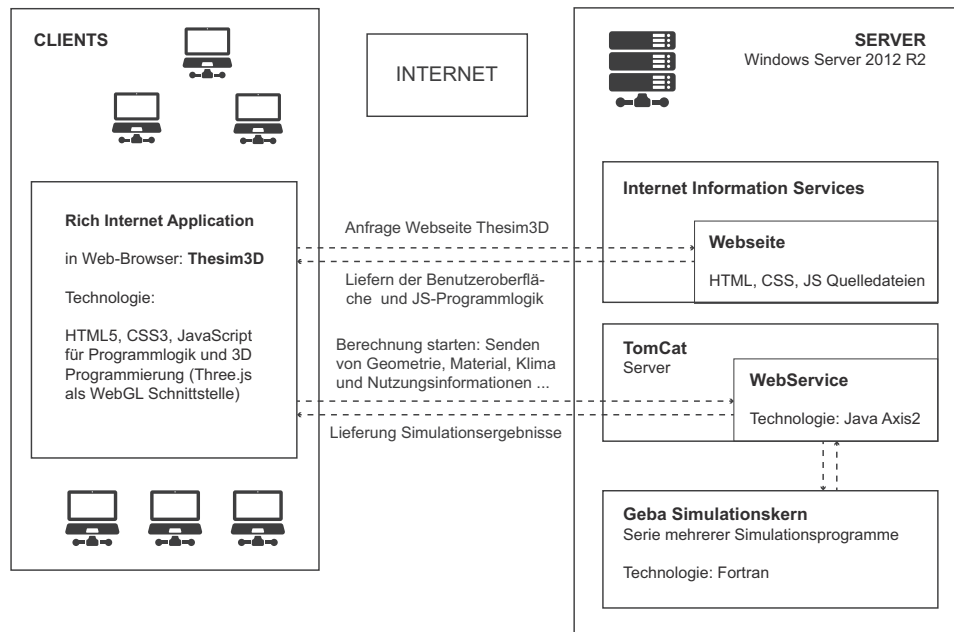
**Bauteilmanager.** Eine vereinfachte Erstellung von Aufbauten durch Plus- und Minus-Symbole zum Hinzufügen von Bauteilschichten ist gewünscht sowie eine nachträgliche Möglichkeit zum Reihen der Schichten.

**Leistenschattung.** Die 3D-Systemskizze zur Erläuterung der Leistenschattungseingabemaske ist nicht unmittelbar verständlich. Die Studierenden würden eine 2D-Darstellung bevorzugen. In der Endfassung wird demnach eine zusätzliche 2D-Skizze das Verständnis erhöhen.

### 6.2.3 Programmarchitektur

Um der Anforderung eines hohen Grades an Plattformunabhängigkeit gerecht werden zu können, eignen sich Webanwendungen durch die gegebene Client-Server-Architektur besonders gut. Sie setzen auf den Computern der BenutzerInnen lediglich einen Webbrowser voraus, der ohnehin auf allen Systemen standardmäßig vorhanden ist. Für die Nutzung einer Webanwendung ist zudem auch ein Internetanschluss notwendig um den entfernten Webserver zu erreichen, jedoch zeigt folgende Statistik, dass die Erfüllung dieser Voraussetzung in Österreich unproblematisch ist. Bereits im Jahre 2015 verfügten 82 % der Haushalte und 99 % der Unternehmen in Österreich über Zugang zum Internet





**Abbildung 6.10:** Diagramm der Client-Server-Architektur von *Thesim3D*.

[1]. Ein weiterer Vorteil in der Umsetzung als Web-App ergibt sich dadurch, dass keine umständliche Softwareinstallation oder ständige Updates durchgeführt werden müssen. BenutzerInnen können bequem eine Webadresse im Browser angeben und umgehend die aktuellste Version der Software nutzen. Die Logik wird ja von einer zentralen Stelle, dem Server, zur Verfügung gestellt.

Das umgesetzte Simulations-Tool lässt sich in die Kategorie einer „Rich Internet Application“ (RIA) einordnen, da auch clientseitig ein nicht unerheblicher Teil an Programmlogik bzw. eine umfangreiche, dreidimensionale grafische Benutzeroberfläche umgesetzt ist. Der Simulationskern liegt jedoch komplett unabhängig auf einem Server. Die Kommunikation zwischen Client und Server übernimmt ein Webservice. Die Programmarchitektur ist in Abbildung 6.10 visualisiert.

#### 6.2.4 Verwendete Technologien

Zur Umsetzung des Clients wurde vor allem die Technologie-Triade des Webs, HTML, CSS<sup>12</sup> und JavaScript genützt. Der Simulationskern wird serverseitig von einem Java-Webservice gekapselt, welches die Kommunikation mit dem Client ermöglicht.

<sup>12</sup>Cascading Style Sheets (CSS) ist eine Formatierungs-Sprache. Mit CSS werden Gestaltungsanweisungen für die Auszeichnungssprachen HTML und XML erstellt.

#### 6.2.4.1 HTML5

HTML gilt als Grundbaustein sowie Kernsprache des Webs und ist grundsätzlich eine textbasierte Auszeichnungssprache, die von Webbrowsern dargestellt werden kann. HTML5 wurde Ende des Jahres 2014 als die fünfte Fassung und derzeit neueste Version der sogenannten „Hypertext Markup Language“ (HTML) spezifiziert. HTML5 definiert etwas genauer gesagt einen Parsing-Algorithmus zur Generierung eines konsistenten „Document Object Model“ (DOM) Baumes, auch aus mehrdeutigem oder minderwertigem Markup (hohe Fehlertoleranz). Es fügt neue Elemente zur Unterstützung von Multimedia- und Web-Anwendungen hinzu und definiert die Regeln und Semantik von bestehenden HTML-Elementen neu. Mit HTML5 können nun Audio und Video nativ in HTML-Dokumente eingebunden werden. Auch Vektorgrafik kann per „Scalable Vector Graphics“ (SVG) Markup einfach eingefügt werden. Robustere Formulare können mit nativer Fehlerprüfung erstellt werden. Sehr wichtig im Zusammenhang des zu erstellenden Berechnungstools ist, dass mit HTML5 und dessen Canvas-Element Grafiken, Animationen und in weiterer Folge auch 3D-Applikationen und Spiele etc. erstellt werden können. HTML5 ist also viel mehr zu einer Anwendungsplattform gereift und nicht mehr wie ursprünglich nur eine Auszeichnungssprache. (Vgl. zu diesem Abschnitt [9])

#### 6.2.4.2 JavaScript, ECMAScript

JavaScript (JS) ist die Programmiersprache des Webs. Sie wurde ursprünglich für dynamisches HTML in Webbrowsern entwickelt, um Benutzerinteraktionen auszuwerten, Inhalte zu verändern, Elemente innerhalb des DOM's nachzuladen oder zu generieren und so die Möglichkeiten von HTML und CSS zu erweitern [58]. Es ist eine plattformübergreifende, objektorientierte Skriptsprache, kompakt und ressourcenschonend. Beinahe jede Webseite benutzt JavaScript und alle modernen Browser – auf Desktops, Spielekonsolen, Tablets und Smartphones besitzen JS-Interpreter. Innerhalb einer Host-Umgebung kann JavaScript mit den Objekten seiner Umgebung verknüpft werden, um diese programmtechnisch zu steuern. JavaScript entstand bei Netscape zu Beginn des Webs und ist eigentlich eine geschützte Marke (ursprünglich von Sun, jetzt Oracle). Bei der Standardisierung der Sprache durch die „European Computer Manufacturer's Association“ (ECMA) erhielt die standardisierte Version der Sprache den Namen ECMAScript. In der Regel spricht man von ECMAScript, wenn man sich auf die Version der Sprache bezieht. Die aktuelle, siebente Version von JavaScript wird offiziell ECMAScript 2016 genannt.

JavaScript scheint wegen der Namensgebung mit der Programmiersprache Java verbunden zu sein – abgesehen von einer oberflächlichen Ähnlichkeit der Syntax unterscheidet sich JS jedoch deutlich von Java. JS verfügt nicht über Javas statische Typisierung und seine strenge Typprüfung. Es gibt keine Unterscheidung zwischen Typen von Objekten. JS ist (noch) nicht wie Java klassenbasiert jedoch objektorientiert. Vererbung funktioniert mittels eines Prototypen-Mechanismus. Jedes beliebige Objekt kann dynamisch um Eigenschaften und Methoden erweitert werden. (Vgl. [27], [105]). Neben der Programmierung der gesamten Client-Logik und der JavaScript basierenden 3D-Programmierung wurde auch die freie JavaScript-Bibliothek jQuery, die Funktionen zur DOM-Navigation und -Manipulation zur Verfügung stellt, zur Entwicklung herangezogen. Für JavaScript, HTML wie auch CSS benötigt es keine spezielle Entwicklungsumgebung. Der komplette Client wurde demnach in einem einfachen, freien Quellcode-Editor (Notepad++ [51]) umgesetzt.

#### 6.2.4.3 WebGL und Three.js

WebGL ist das Standard-3D-Grafik-API für das Web. Es ermöglicht EntwicklerInnen innerhalb von Browsern mit JavaScript die volle Leistung der 3D-Rendering-Hardware des Computers zu nutzen. Vor WebGL waren EntwicklerInnen auf Plugins oder native Anwendungen angewiesen. Um eine hardwarebeschleunigte 3D-Visualisierung liefern zu können, mussten BenutzerInnen spezifische Software herunterladen und installieren. Während WebGL nicht in der offiziellen HTML5-Spezifikation ist, wird sie mit den meisten Browsern ausgeliefert, die HTML5 unterstützen. Die Entwickler bei Google, Apple, Mozilla, Microsoft, Amazon, Opera, Intel und Blackberry betrachten 3D als eine wesentliche Komponente, um Browser zu einer First-Class-Anwendungsplattform zu machen. Damit ist eine Zukunftsfähigkeit dieser Technologie unbestritten. WebGL funktioniert mittlerweile auf den meisten Desktops und fast allen mobilen Browsern. Dies eröffnet die Möglichkeit, in einem künftigen Entwicklungsschritt das Berechnungstool auch auf mobilen Plattformen wie Tablets oder Smartphones anbieten zu können. WebGL ist ein Low-Level-Zeichnungs-API: Es wird mit Arrays von Daten und einem Shader beliefert, worauf auf Basis dieser Eingaben das Rendering gestartet werden kann. Es gibt allerdings mehrere Open-Source-JavaScript-Toolkits, die Zugriff auf das API auf höherer Ebene erlauben. Selbst mit einem Toolkit bedarf es an Verständnis der 3D-Programmierung, um etwa jegliche Objekt-Transformationen durch Abfolgen von Transformations-Matrizen bewerkstelligen zu können.

Es gibt bereits mehrere Toolkits, die auf WebGL aufbauen. Als unangefochten in dieser Kategorie kann man jedoch Three.js nennen. Es bietet eine einfache, intuitive Sammlung von Objekten und Funktionen. Three.js abstrahiert die Details des WebGL-API, die 3D-Szene wird somit durch Meshes, Materialien und Lichter repräsentiert – Objekttypen mit welchen Grafik-ProgrammiererInnen in der Regel arbeiten. Es ist zudem durch den Gebrauch bewährter Grafik-Engine-Techniken als schnell einzustufen. Three.js ist Open-Source, auf GitHub verfügbar und durch mehrere Autoren gut gepflegt und dokumentiert. (Vgl. zu diesem Abschnitt [99])

#### 6.2.4.4 Java Webservice, Axis2, Tomcat, IIS

Ein Webservice ist ein Software-System, das über ein Netzwerk interoperable Interaktion (Gerät zu Gerät) unterstützt. Jedes Webservice besitzt einen „Uniform Resource Identifier“ (URI), d. h. eine Web-Adresse, über die es eindeutig identifizierbar ist. Es verfügt über eine klar definierte Schnittstelle, über die andere Systeme mit dem Webservice interagieren (z. B. über SOAP<sup>13</sup> oder REST<sup>14</sup>). Die Nachrichten werden in der Regel im XML<sup>15</sup> oder JSON<sup>16</sup> Format in Verbindung mit anderen Web-bezogenen Standards wie HTTP übertragen (vgl. [38]).

Axis2, hervorgegangen aus Apache Axis, ist ein Java-Framework zur Entwicklung von Webservice-Anwendungen auf Basis von SOAP oder REST. Apache Axis2 kann als das de facto Open-Source Java-Webservice-Framework angesehen werden, das sowohl in der Industrie als auch im akademischen Bereich eingesetzt wird. Apache Axis2 ist effizienter, modularer und XML-orientierter als ältere Versionen und wurde auch aus Gründen höherer Sicherheit und Zuverlässigkeit entwickelt. (Vgl. [54], [31]). Axis2 kann in unterschiedlichen Formen zum Einsatz kommen. Im Fall dieser Anwendung ist Axis2 in den Open-Source-Webserver Tomcat eingespielt, um das Java Webservice öffentlich erreichen zu können.

Das Java Webservice übernimmt die Aufgabe der Schnittstelle zu dem Geba-Simulationskern. Der Geba Simulationskern besteht aus mehreren Programmen, die seriell ausgeführt werden müssen. Jedes dieser Programme erfordert die Existenz von strikt formatierten Eingabedaten.

---

<sup>13</sup>Simple Object Access Protocol (SOAP) ist ein Netzwerkprotokoll, mit dem Daten zwischen Systemen ausgetauscht und Remote Procedure Calls durchgeführt werden können.

<sup>14</sup>Representational State Transfer (REST)

<sup>15</sup>Extensible Markup Language (XML) ist eine textbasierte Auszeichnungssprache zur Darstellung hierarchisch strukturierter Daten.

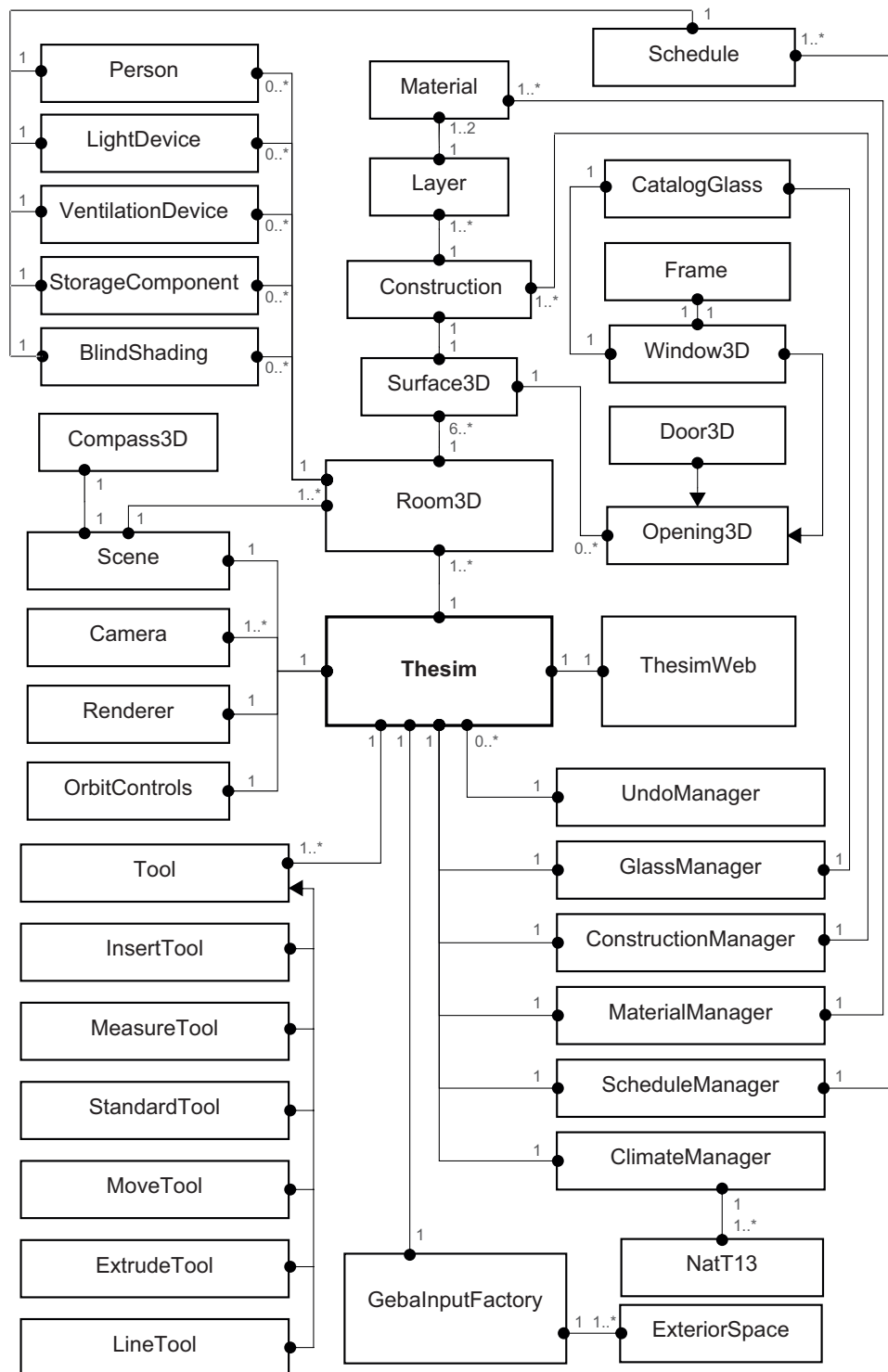
<sup>16</sup>JavaScript Object Notation (JSON) ist ein textbasiertes, kompaktes Datenformat zum Zweck des Datenaustausches zwischen Anwendungen. Jedes gültige JSON-Dokument ist ein gültiges JavaScript.

teilen (Fortran-Nomenklatur), die auf Basis der von *Thesim3D*-Client gesendeten Informationen generiert werden können. Die Simulationsprogramme sind Fortran-kompilierte Algorithmen und benötigen aufgrund des Formats (\*.exe) ein Microsoft Windows Betriebssystem zur Ausführung. Das Webservice wird deshalb auf einem Windows Server (2012 R2 Datacenter 64bit) gehostet. Für das Webservice wird ein Tomcat Server auf der Windows Plattform installiert. Das auf dem Windows Server ohnehin zur Verfügung stehende Internet Information Service (IIS8) stellt die Webseite zur Verfügung. Auf Anfrage eines Clients wird diesem dann die gesamte Client-Logik in Form von JavaScripts geliefert. Webseite und Webservice agieren auf unterschiedlichen Ports der gleichen Maschine. Die aus der Prozessabfolge der Geba-Programme generierten Simulationsergebnisse werden dann XML-formatiert an den *Thesim3D*-Client zur grafischen Aufbereitung zurückgesendet.

### 6.2.5 Objektorientiertes Design

Die Programmiersprache JavaScript, die zur Umsetzung des *Thesim3D*-Clients verwendet wurde, kann sowohl prozedural als auch objektorientiert eingesetzt werden. Aufgrund der Komplexität des Modells eignet sich ein objektorientiertes Design. Ein grober Überblick über Entwurf und Zusammenhang der Objekte, die in dem Namespace `NAC` zusammengefasst sind, ist in Abbildung 6.11 ersichtlich. Jedes der Objekte beinhaltet für sich relevante Logik und Datenhaltung und erbt ggf. weitere von übergeordneten Prototypen. Exemplarisch wird ein Teil der Struktur vereinfacht erläutert:

Das Objekt `Raum` (`NAC.Room3D`) beispielsweise verfügt über beliebig viele Bauteile (`NAC.Surface3D`) und über etliche Eigenschaften wie z. B. Volumen und Flächeninhalte. Zudem wurde der Entwurf so gehalten, dass ein Raum-Objekt Funktionalitäten des Objektes `THREE.Object3D` erbt, entsprechende Funktionen erweitert und somit der 3D-Szene (`THREE.Scene`) hinzugefügt und gerendert werden kann. Ein Bauteil wiederum beinhaltet beliebig viele Öffnungen (`NAC.Opening3D`), wobei eine Öffnung ein Fenster oder eine Türe darstellen kann (`NAC.Window3D`, `NAC.Door3D`). Zudem ist jedem Bauteil eine Konstruktion (`NAC.Construction`) zugewiesen, die wiederum aus beliebig vielen Bauteilschichten (`NAC.Layer`) besteht. Eine Bauteilschicht wiederum besteht entweder aus nur einem Material und ist damit homogen oder aus mehreren Materialien und ist damit inhomogen (`NAC.Material`). Aus bauphysikalischen Gründen wird derzeit die Inhomogenität jedoch auf eine Schicht (mit maximal zwei verschiedenen Materialien) pro Konstruktion beschränkt.



**Abbildung 6.11:** Übersicht über das objektorientierte Design des *TheSim3D*-Clients im UML-Stil.

### 6.2.6 Berechnungsmethode und Validierung

*Thesim3D* simuliert das thermische Verhalten eines Raumes im periodisch eingeschwungenen Zustand (Periodenlänge: 1 Tag). Es ist daher insbesondere für normgemäße Sommertauglichkeitsuntersuchungen (z. B. gemäß EN ISO 13791 oder ÖNorm B 8110-3) geeignet. Der periodisch eingeschwungene Berechnungsansatz sowie die Beschreibung der Wärmeleitungs- und Wärmespeicherungsmechanismen über das Bauteil-Matrizenverfahren haben sich als Methoden zur planungsbegleitenden rechnerischen Simulation derart bewährt, dass sie mittlerweile auch in nationale und internationale Normen (ÖNorm B 8110-3 [92], EN ISO 13791 [93], EN ISO 13786 [97]) übernommen wurden [68]. Die Grundlagen zu den genannten Rechenverfahren ist in den Abschnitten 2.7 und 3.3.2 dieser Arbeit auf verständliche Weise wiedergegeben sowie in [40] und [43] ursprünglich behandelt.

Intendiertes Ziel ist es, das Tool auch zum Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes anwenden zu können. Wie in Abschnitt 3.1.1 erläutert, definiert die österreichische Normung in der aktuellen Ausgabe der ÖNorm B 8110-3:2012, dass Simulationsprogramme zum Nachweis die Anforderungen der ÖNorm EN ISO 13791 erfüllen müssen. Wird diese Definition derart interpretiert, dass das Simulationsverfahren nach dem Validierungsverfahren der EN ISO 13791 validiert sein muss, so dürfte *Thesim3D* nach aktueller österreichischer Gesetzeslage nicht zum Nachweis angewendet werden, da es wie in Abschnitt 6.2.3 und 6.2.9.4 beschrieben auf den Rechenkern Geba aufsetzt und damit nicht nach EN ISO 13791:2012 validiert ist. Als Näherungsverfahren ist es jedoch nach der besten Klasse 1 der EN ISO 13792 validiert. Die Validierung von Geba wird in Abschnitt 5.2 beschrieben. An dieser Stelle sei jedoch angemerkt, dass die derzeitige Lage in Österreich auch nicht der Norm entspricht: die Nachweise zur Vorlage bei den Behörden werden in der Regel anhand der typischen österreichischen Bauphysikprogramme (siehe Abschnitt 4.1.1) erstellt – das in den Programmen zur Verfügung gestellte Simulationsverfahren als Alternative zum vereinfachten Verfahren ist laut Auskunft bei den Herstellern derzeit auch nicht nach EN ISO 13791 validiert.

### 6.2.7 Usability Engineering

„Usability“ oder die entsprechende deutsche Bezeichnung „Gebrauchstauglichkeit“ lässt sich sehr gut mit einer Begriffsdefinition aus der ÖNorm EN ISO 9241-210[90] zusammenfassen:

*Das Ausmaß, in dem ein Produkt durch bestimmte BenutzerInnen in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden*

*kann, um bestimmte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen.*

Um ein möglichst hohes Ausmaß an Gebrauchstauglichkeit zu erreichen, können Mittel und Techniken des „Usability Engineering“ (UE) angewendet werden. Dies beinhaltet neben der Fragestellung, wer die genaue Benutzergruppe ist, die Analyse der Arbeitsabläufe sowie die Festlegung der idealen Funktionalität und Konzeption einer passenden Benutzerschnittstelle. Eine wesentliche Aufgabe von Usability Engineering ist es, unnötige Komplexität zu vermeiden und die Funktionalität eines Produktes auf ein für BenutzerInnen ideales Minimum zu reduzieren, womit viele Fehlerquellen eliminiert werden können. Das technische System soll AnwenderInnen in der Ausführung der Ziele optimal unterstützen und wird genau dafür konzipiert. Bei der Entwicklung des Werkzeuges *Thesim3D* wurden typische Usability Methoden angewendet, um ein hohes Maß an Gebrauchstauglichkeit und damit u. a. folgende Ziele zu erreichen (vgl. zu diesem Abschnitt [108]):

- Die Arbeitsgeschwindigkeit der BenutzerInnen mit dem neuen System maximieren.
- Die Anzahl notwendiger Schritte zur Ausführung und die dafür benötigte Zeit minimieren.
- Den Einarbeitungsaufwand minimieren.
- Die Qualität des Arbeitsergebnisses steigern.
- Die Anzahl auftretender Fehler der BenutzerInnen minimieren.
- Fehlinterpretationen reduzieren.
- Zufriedenheit und Interesse der BenutzerInnen erhöhen.

### **6.2.8 Programmbeschreibung und -ablauf**

Das entwickelte Tool *Thesim3D* ist ein Werkzeug zur Berechnung der operativen Raumtemperaturen im Sommer. Einerseits soll es PlanerInnen bei der Entwurfsfindung hinsichtlich eines sommertauglichen Raumes unterstützen, andererseits soll es als Nachweistool dienlich sein. Den entwickelten Anforderungskriterien entsprechend und nach den Ansätzen des Usability Engineering sollte die Benutzeroberfläche möglichst einfach und übersichtlich umgesetzt werden. Für die BenutzerInnen sollen schnell und mit möglichst geringem Aufwand Resultate erzielbar sein. Ziel war es u. a. eine sofortige Benutzbarkeit des Werkzeuges ohne das Lesen umfangreicher Handbücher zu ermöglichen. Folgende Beschreibung wird also nicht als Handbuch angesehen, sondern dient der Beschreibung der Überlegungen hinsichtlich der intuitiven Benutzeroberfläche.



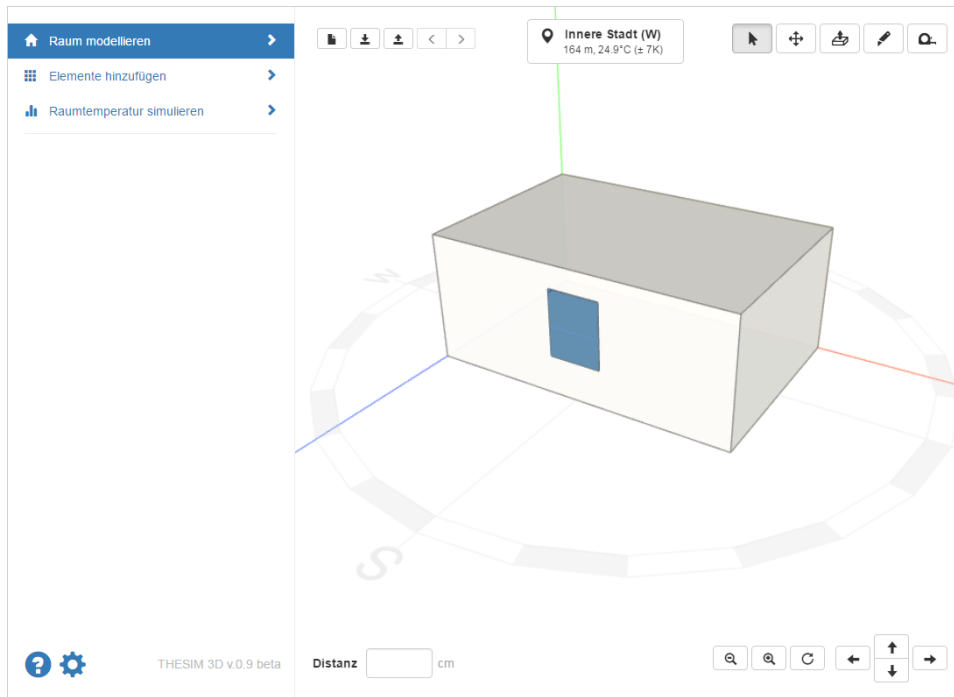


Abbildung 6.12: GUI von *Thesim3D* nach Programmstart.

Aufgrund der Vorgabe eines Standard-Volumens des Raumes, Standard-Aufbauten der Bauteile, sowie Standard-Werte hinsichtlich den Randbedingungen kann theoretisch mit nur einem Maus-Klick eine Simulation durchgeführt werden. Natürlich gilt es Standort, Raumgeometrie, Bauteil-Aufbauten, Fenster, Nutzung etc. den eigenen Vorgaben anzupassen. Diese Anpassungen können jedoch sehr intuitiv und schnell durchgeführt werden. Oberstes Gebot war es hierbei, besonders die üblicherweise aufwändige Flächenermittlung durch schnelles und einfaches 3D-modellieren zu automatisieren und bereits hier eine typische Fehlerquelle auszuschalten. Anhand einiger Abbildungen der Programmoberfläche werden folgend grundsätzliche Funktionen sowie der Ablauf erläutert. Abbildung 6.12 zeigt die Oberfläche der Webanwendung nach dem ersten Aufruf. Die Oberfläche ist bewusst übersichtlich in nur zwei Abschnitte aufgeteilt, was konsistent in jedem Programmbereich so beibehalten wird. Der linke Teil beinhaltet ein leicht überschaubares Menü mit nur drei Punkten, der rechte, größere Hauptbereich, bildet abhängig vom links ausgewählten Menüpunkt Inhalte ab. Die drei Hauptmenüpunkte geben zwar einen grundsätzlichen Ablauf vor, durch die Flexibilität des Tools und Standardvorgaben kann aber zu jedem beliebigen Zeitpunkt jede beliebige Funktion ausgeführt werden –

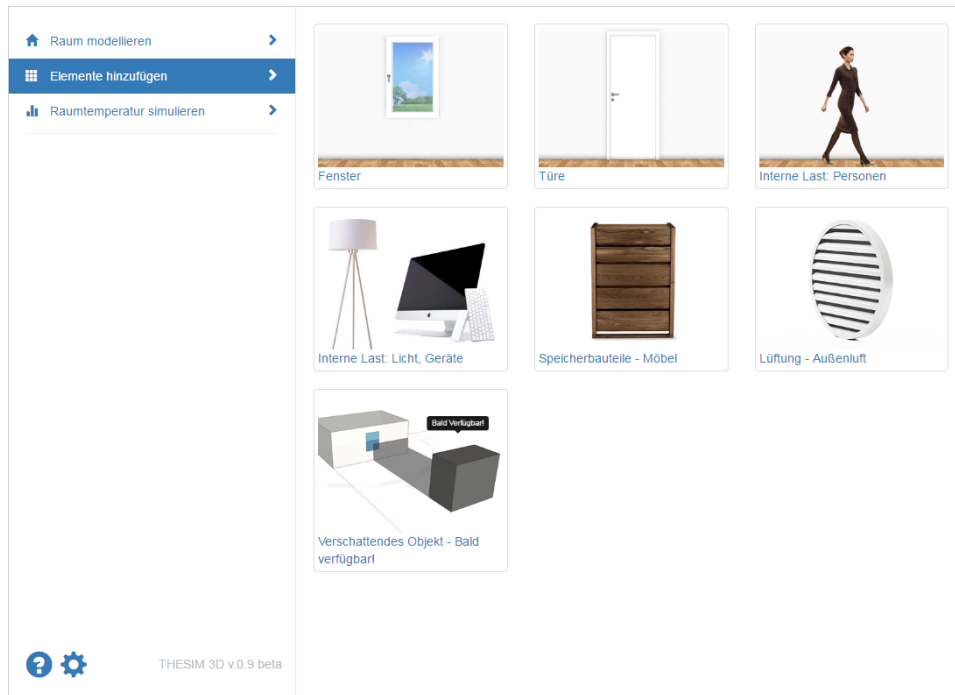
bereits direkt nach Programmaufruf kann demnach eine fehlerfreie Berechnung durchgeführt werden. Die Hauptmenüpunkte werden folgend kurz beschrieben:

**Raum modellieren.** In der Startkonfiguration ist dieses Fenster zur 3D-Modellierung des Raumes aktiviert. Hier findet der Großteil der Datenaufbereitung für die Simulation statt. Es besteht nicht nur die Möglichkeit die Raumgeometrie anzupassen, sondern auch Eigenschaften wie Bauteilaufbauten, Fenstereigenschaften, Standort und damit Klima, Nutzung, etc. festzulegen. Dies geschieht mittels Interaktionen mit Elementen des 3D-Modells und durch Verwendung entsprechender Schaltflächen.

**Elemente hinzufügen.** Nach Auswahl dieses Hauptmenüpunkts verändert sich der rechte Hauptbereich zu einer Auflistung baulicher Elemente wie Fenster oder Türen, wärmespeichernden Elementen wie Raumzwischenwände oder Möbel, aber auch die Nutzung betreffende Elemente wie Personen, Beleuchtung und Geräte (interne Lasten), sowie Lüftungselemente. Diese können hier ausgewählt und dem zu untersuchenden Raum zugewiesen werden. Für den visuellen Anspruch und zum schnellen Verständnis gibt es auch hier zu jedem der Elemente ein aussagekräftiges Referenzbild (siehe Abb. 6.13).

**Raumtemperatur simulieren.** Spielerisch und gleichzeitig analytisch kann nach jeder Änderung, spätestens aber zur Nachweisführung ein Berechnungsvorgang gestartet werden. Der Vorteil des periodisch eingeschwungenen Berechnungsansatzes gegenüber jenem eines Zeitschrittverfahrens hinsichtlich der Berechnungszeit kann an dieser Stelle voll ausgenutzt werden – es wird umgehend ein Ergebnis geliefert, was die analytische und spielerische Nutzungsweise erst möglich macht. Der Außentemperaturverlauf sowie der gesuchte Verlauf der berechneten operativen Temperatur im Raum werden folgend in einem Diagramm mit viertelstündlichen Werten, sowie tabellarisch in stündlichen Werten dargestellt. Eine detaillierte Eingabedokumentation, sowie umfangreiche Informationen zur Temperaturverteilung und den Wärmeströmen in den Bauteilen können nach dem Akkordeon Prinzip im unteren Bereich des Ergebnisfensters auf- und zugeklappt werden (siehe Abbildung 6.27).

Um ein ansprechendes und übersichtliches, auf das Wesentliche reduziertes Design der Oberfläche zu gewährleisten – sowie unter Berücksichtigung des Umstands, dass ArchitektInnen und andere PlanerInnen in der Regel visuell orientierte Wahrnehmungstypen sind – wurde versucht möglichst wenig textbasierte Menüpunkte und Schaltflächen zu



**Abbildung 6.13:** GUI: Hinzufügen von Elementen.

erzeugen. An ihre Stelle sollen aussagekräftige Symbole (Icons) treten, wobei im Sinne des Usability Engineerings versucht wird, jede Missinterpretation zu unterbinden. In diesem Fall durch einen erklärenden, textbasierten Hinweis, der bei Mausbewegung über das Icon sofort aufscheint. Abbildungen 6.13 bis 6.27 zeigen Ausschnitte der Benutzeroberfläche die folgend kommentiert werden.

Im Fenster „Raum modellieren“ (siehe Abb. 6.14) wird – wie beschrieben – der Großteil der Client-Funktionalität abgewickelt. Zur Interaktion kommt neben ein paar numerischen Eingaben mit der Tastatur vorwiegend die Maus zur Anwendung. Mit der linken Maustaste lässt sich die 3D-Ansicht drehen und im Standardmodus Elemente auswählen. Mit der rechten Maustaste kann man die Ansicht verschieben, durch Scrollen die Ansicht zoomen. Es gibt in diesem Fenster mehrere Schaltflächen, die funktionsbezogen zu Blöcken zusammengefasst wurden. So gibt es links oben Symbole, die als Schaltflächen für das Anlegen, Speichern und Laden von Projekten, sowie zum Rückgängigmachen von Aktionen agieren. Oben mittig befindet sich eine Art Ortstafel mit der Höhenlage und dem Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur des Norm-Sommertags. Dieser Mittelwert hängt sowohl vom Gebäudestandort als auch von der Höhenlage ab und gibt den

BenutzerInnen einen Hinweis auf die am Standort herrschenden hochsommerlichen Temperaturen.

Rechts oben finden sich gebündelt die Werkzeuge zum Verändern und Überprüfen der Raumgeometrie. Rechts unten befinden sich Funktionen zum Navigieren in der 3D-Szene. Mittig unten erscheinen nach Hinzufügen von Nutzungselementen entsprechende Symbole (Personen, Beleuchtung und Geräte, Lüftung, etc.). Abschließend befindet sich links unten ein Distanz-Feld, das bei Geometrieänderungen relative Distanzen ausgibt, oder auch die Eingabe gewünschter Distanzen bei Verschiebe- oder Extrusionsvorgängen erlaubt. Das Raummodell befindet sich in einer dreidimensionalen Szene, orientiert an einem kartesischen Koordinatensystem. Die orthogonalen Achsen sind farblich dargestellt (X-Achse: rot, Y-Achse: grün, Z-Achse: blau). Diese Achsen dienen als Basis für Veränderungen an der Geometrie. Die Schaltflächen zur Veränderung und Überprüfung der Raumgeometrie werden folgend erläutert:

#### **Auswählen**

Mit der Auswahl-Funktion können die BenutzerInnen durch Klick mit linker Maustaste Flächenelemente wie Wände, Dachflächen, etc. auswählen und deren Eigenschaften anpassen. Selbiges gilt für Fenster, Türen oder auch hinzugefügte Elemente wie interne Lasten. Die Ausrichtung des Raumes kann auf einfache Weise bei aktivierter Auswahl-Funktion durch Klick und Verschieben des Kompasses verändert werden.

#### **Verschieben**

Mit dem Verschiebe-Tool können die BenutzerInnen Flächen, Kanten und Eckpunkte verschieben. Um beispielsweise einen Raum zu vergrößern, wird einfach mittig auf eine gewünschte Seitenfläche geklickt, womit sich die Fläche im Verschiebemodus befindet und dann entlang einer passenden Koordinatenachse verschoben werden kann. Verschieben lässt sich entweder durch Klick mit linker Maustaste und gleichzeitiger Mausbewegung und dann Loslassen der Taste, oder durch Klick, Loslassen, Mausbewegung und wieder Klick. Bei der zweiten Option kann nach dem ersten Klick eine Länge in cm mit der Tastatur eingeben und mit der „Enter“-Taste bestätigt werden (relative Distanz vom Verschiebestartpunkt ausgehend). Die Flächen müssen dabei immer koplanar bleiben. Wollen BenutzerInnen beispielsweise einen Punkt einer Rechteckfläche orthogonal zu dieser Fläche verschieben, weist *Thesim3D* mit einem roten Ausrufezeichen darauf hin, dass das nicht möglich ist (weil dadurch nicht mehr alle Punkte der Seitenfläche auf einer Ebene wären und die Geometrie damit

zerstört wäre). Wenn eine Fläche, eine Kante, oder ein Punkt verschoben wird, passen sich angrenzende Flächen entsprechend an.

### **Extrudieren**

Die Extrusions-Funktion ist der Verschiebe-Funktion sehr ähnlich, jedoch wird die zu verändernde Fläche nicht verschoben sondern extrudiert. Dies findet meist dafür Anwendung, um ein geteiltes Flächenelement aus der Ebene herauszuextrudieren und die Nachbarfläche(n) dabei gleichzubelassen.

### **Teilen**

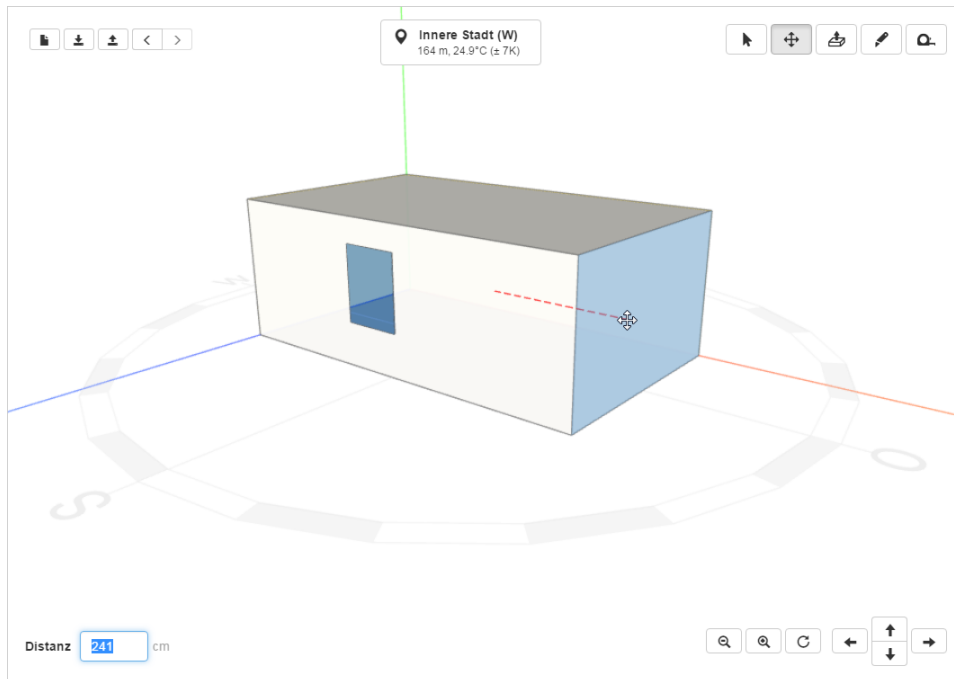
Mit der Teilen-Funktion können die BenutzerInnen Flächen teilen. Das ist von Kante zu Kante möglich, z. B. um ein Satteldach zu erzeugen. Dabei wird die Flachdachfläche mittig geteilt und dann die neu entstandene Kante nach oben (grüne Achse) geschoben.

### **Abmessen**

Die Messfunktion ermöglicht die Überprüfung der Raumdimensionen. Zeigt die Maus auf eine Kante oder Ecke des Modells, so bewirkt ein erster Klick mit der linken Maustaste eine Markierung des ausgewählten Punkts und gleichzeitig eine Rücksetzung der Distanzanzeige auf Null. Eine weitere Bewegung der Maus führt sofort zur Anzeige der relativen Distanz zwischen Startpunkt und aktueller Cursor-Position in cm.

Durch Drücken der ESC-Taste kann während einer Aktion abgebrochen und der ursprüngliche Zustand wieder hergestellt werden.

Neben der Flächenermittlung ist das Ermitteln und die Eingabe bzw. Umwandlung von Klimadaten in lesbare Formate diverser Simulationsprogramme ein weiterer zeitintensiver Aufwand im Zuge thermischer Gebäudesimulationen, den es für das Tool so weit als nur möglich zu vereinfachen galt. Der periodisch eingeschwungene Berechnungsansatz bringt auch hier seine Vorteile, da nur die Klimadaten eines sommerlichen Tages benötigt werden. Es wird hierbei angenommen, dass dieser Tag sich ständig wiederholt. Das Berechnungsergebnis spiegelt bei diesem Berechnungsansatz das thermische Raumverhalten am Ende einer Hitzeperiode wider. Im Zuge der periodisch eingeschwungenen Berechnung müssen – was das Außenklima betrifft – lediglich der Tagesgang der Außenlufttemperatur sowie Angaben zu den solaren Bestrahlungsstärken für alle transparenten Flächen der Gebäudehülle bekannt sein. Der Tagesgang der Außenlufttemperatur wird gemäß ÖNorm B 8110-3 [92] über einen sinusähnlichen Verlauf angenähert. Damit genügt es, nur mehr Tagesmittelwert und Tagesschwankung der Außenlufttemperatur zu definieren. Da die Tagesschwankung, d. h. die Differenz von



**Abbildung 6.14:** GUI: Hauptfenster 3D-Modellbereich während einer Raumeometrieänderung, Verschieben einer Bauteilfläche.

Tagesmaximum und Tagesminimum bei normgemäßer Berechnung mit 14,0 K vorgegeben ist (diese kann jedoch über das Menü „Einstellungen“ von den BenutzerInnen bei Bedarf geändert werden), wäre lediglich der Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur unbekannt. Das Tool geht in der Vereinfachung noch einen Schritt weiter, wodurch den BenutzerInnen die einfachste und verständlichste Art geboten wird: aus einer vorgegebenen Liste kann einfach ein Standort ausgewählt werden. Das System berechnet und referenziert zu jedem Ort mit optionaler Angabe der genauen Höhenlage mit der sogenannten Normaußentemperatur Nat-T13 (siehe Abschnitt 3.2.2). Den BenutzerInnen stehen 7846 österreichische Katastralgemeinden auch mit Suchfunktion für schnelle Zuweisung oder als Dropdown-Liste nach Bundesländern geordnet zur Verfügung. Es wird vorerst automatisiert die niedrigste am ausgewählten Standort vorkommende Seehöhe zur Berechnung der mittleren Außenlufttemperatur herangezogen, da dies der kritische Fall ist<sup>17</sup>. Es scheint aber als Information die Minimal- sowie Maximalhöhe der Katastralgemeinde auf, sodass sich die BenutzerInnen an diesen Werten

<sup>17</sup>Nach ÖNorm B 8110-5 Bb12 [89] reduziert sich die Normaußentemperatur pro 100 Höhenmeter um 0,5 K.

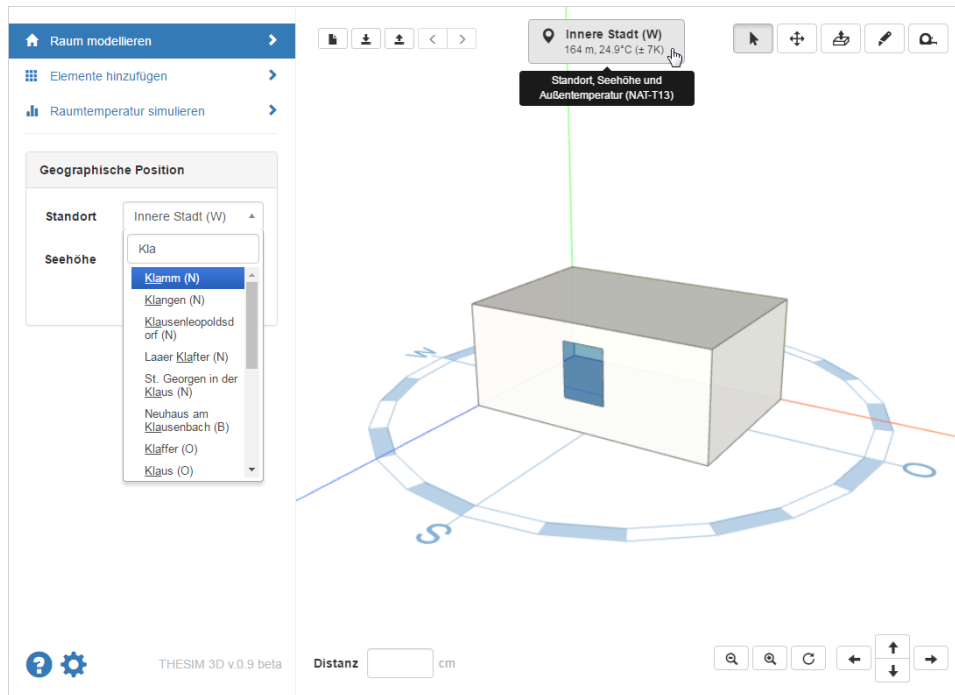
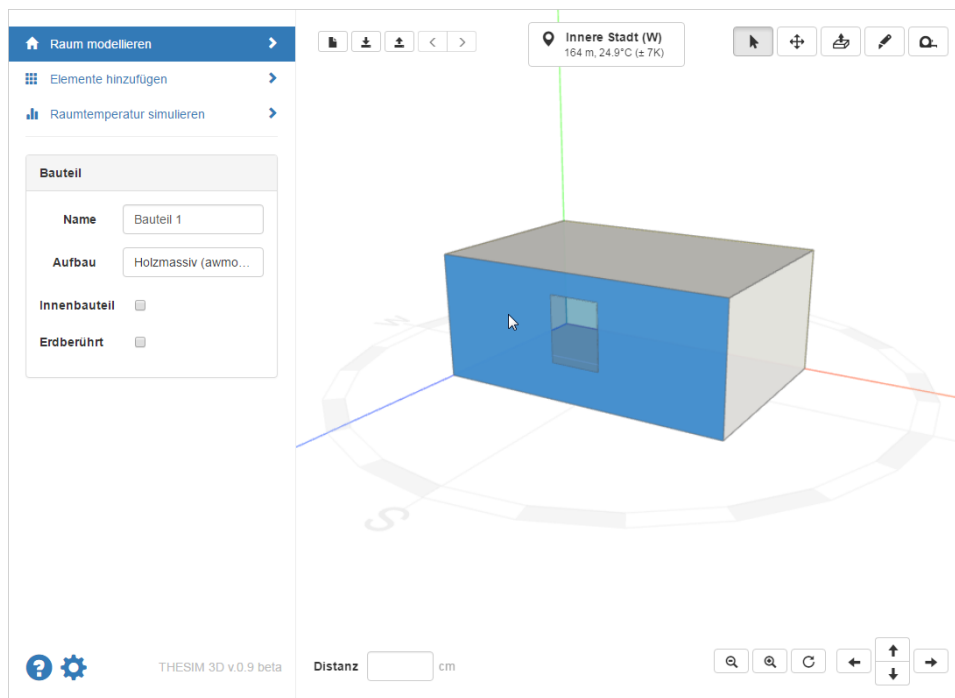


Abbildung 6.15: GUI: Verändern des Standortes.

zur Plausibilität orientieren können. Voreingestellt ist vom System der Standort Wien, Innere Stadt. Wie in Abbildung 6.15 veranschaulicht, erscheint durch Klick auf die „Standorttafel“ am Bildschirm links das Kontextmenü zum Ändern des Standortes. Bei Änderung des Standortes ist dies sofort und ständig in der aktualisierten „Standorttafel“ ersichtlich. In Abbildung 6.15 ist auch ein Kompass im 3D-Bereich sichtbar, der die Orientierung des Raumes einfach verständlich darstellt. Im Standardmodus (Auswählen) kann dieser Kompass durch Maus-Klick beliebig rotiert werden, wodurch die Ausrichtung des Raumes hin zu einer anderen Himmelsrichtung auf schnelle Weise geändert werden kann.

Die nächste wichtige Funktionalität, die einfacher Handhabung bedarf, ist das Ändern von Bauteileigenschaften, im Speziellen das Zuweisen von Bauteilaufbauten. Durch Maus-Klick auf eine gewünschte Fläche der Raumhülle im 3D-Bereich erscheint auf der linken Bildschirmseite das Bauteil-Kontextmenü (siehe Abb. 6.16). Um übersichtlich zu bleiben, enthält diese nur folgende vier Punkte: Ein Bauteilname für bessere Assoziation und für einfache Überprüfung der Eingabedokumentation, der Name des Schichtaufbaus, der an dieser Stelle geändert werden kann, sowie die Möglichkeit die Art des Bauteils festzulegen: Entweder Innenbauteil oder erdberührter Bauteil. Vorbelegt sind alle



**Abbildung 6.16:** GUI: Auswahl eines Bauteils.

Bauteile als Außenbauteile, die an die Außenluft grenzen. Wird der Bauteil als Innenbauteil spezifiziert, so wird dieser symbolisch gelb, als erdberührter Bauteil braun dargestellt – somit ist die Art der Bauteile für die BenutzerInnen ständig wahrnehmbar. Ungewollte Fehluweisungen sind unmittelbar ersichtlich.

Abbildung 6.17 zeigt die Funktionsweise zur Veränderung des Bauteil-Schichtaufbaus. Zur besseren Lesbarkeit wird jede zweite Schicht des Aufbaus farblich hervorgehoben. Jede Schicht erlaubt die Zuweisung eines Materials entweder durch das Auswählen aus einer vorgegebenen Materialliste, sortiert nach Materialgruppen, oder durch selbständige Eingabe der benötigten Kenngrößen. Zur Auswahl stehen 436 Materialien des Katalogs für wärmeschutztechnische Rechenwerte von Baustoffen und Bauteilen, ON-V-31 [85]. Durch entsprechende Plus- und Minussymbole können Schichten bequem hinzugefügt oder gelöscht werden. Bauteilschichten können nach Belieben untereinander verschoben werden. Ein weiteres Material kann einer Schicht hinzugefügt werden (siehe Abb. 6.18), wodurch auch eine inhomogene Konstruktion wie Holzständerbauweise abgebildet werden kann. Zusätzlich zur Listendarstellung gibt es vor allem aus Gründen einer schnellen Prüfbarkeit auch eine Visualisierung der Konstruktion, in welcher nicht nur Fehl-



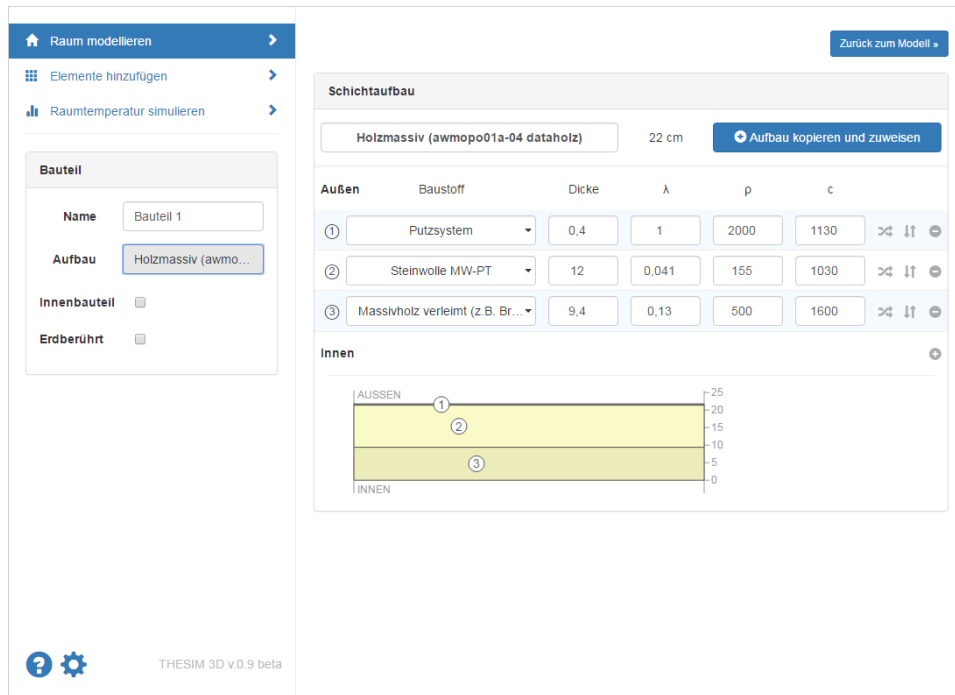


Abbildung 6.17: GUI: Änderung des Schichtaufbaus eines Bauteils.

eingaben von Schichtdicken, sondern auch Fehleingaben der Wärmeleitfähigkeit der Materialien schnell erkannt werden können: die Farbe des Materials wird abhängig von dessen Wärmeleitfähigkeit erzeugt; von hellen, gelblichen Farben bei geringer Wärmeleitfähigkeit (Dämmstoffe, Holz, etc.) hin zu dunklen, bläulichen Farbtönen bei Beton oder noch höheren Wärmeleitfähigkeiten wie bei metallischen Baustoffen.

Äquivalent zur Auswahl eines opaken Flächenelements wie beispielsweise der zuvor beschriebenen Wandfläche können auch Fenster im 3D-Bereich ausgewählt werden. Nach Auswahl erscheint auch hier ein Kontextmenü im linken Abschnitt um Eigenschaften des Fensters anpassen zu können (siehe Abb. 6.19). Neben Eingabefeldern für Breite und Höhe, deren Änderung sich umgehend im 3D-Bereich auswirkt, können der Glastyp, Fensterrahmenart, natürliche Lüftung und Beschattung definiert werden. Bei Aktivierung einer Jalousie oder natürlicher Lüftung durch ein Fenster wird ein entsprechendes Symbol auch im 3D-Bereich sichtbar und weist ständig auf die Setzung der entsprechenden Eigenschaft hin. Durch dieses durchgängige System ist immer auf einen Blick ersichtlich, welche Eigenschaften dem Modell aktuell zugeordnet sind. Ein vorgefertigter Glasdatenkatalog mit 50 verschiedenen Glastypen, zwecks besserer Übersichtlichkeit gruppiert (1-fach, 2-fach,

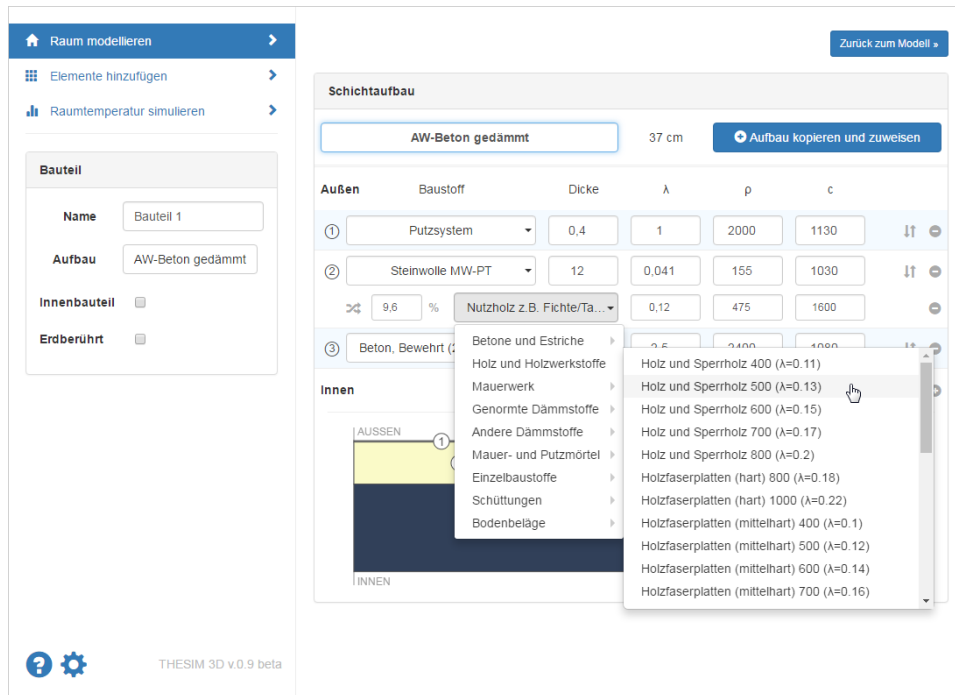


Abbildung 6.18: GUI: Änderung einer Bauteilschicht zur Inhomogenität.

3-fach Verglasung), enthält alle für die Simulation nötigen Glasparameter und nimmt hier aufwändige Eingabe ab. Es erscheint auch sinnvoll, an dieser Stelle die durch das ausgewählte Fenster optional mittels Fensteröffnung verursachte natürliche Lüftung zu spezifizieren. Abbildung 6.20 zeigt, wie festgelegt werden kann ob das Fenster geöffnet ist, und wenn, nach welchem zeitlichen Verlauf und ob es gänzlich geöffnet ist, oder nur mit einem gewissen Kippwinkel<sup>18</sup>. Angeboten werden drei vordefinierte Zeitverläufe: Immer geöffnet, tags von 8-20 Uhr oder nachts von 20-8 Uhr. Es können jedoch auch beliebige Zeitverläufe selbst erzeugt werden. Auch hier gibt es als Kontrollmechanismus eine diagrammartige Darstellung des Zeitverlaufs.

Abbildung 6.21 zeigt die optionale Aktivierung einer Außenjalousie, wobei Start- und Endzeitpunkt, oder eine Aktivität bei direkter Sonnenstrahlung auf das Fenster festgelegt werden können. Die Strahlungsdurchlässigkeit der Jalousie wird mit dem aus der Norm bekannten  $F_C$ -Wert (früher z-Wert) angegeben. Ein Fensterrahmen kann wie in Abbildung 6.22 über Materialität, U-Wert und prozentualer Anteilsfläche am Fenster definiert werden. Um die Verschattung der Glasflächen

<sup>18</sup>Ein für ein standardformatiges Fenster typischer Wert von  $6^\circ$ , der sich z. B. bei 1,3 m Fensterhöhe und 0,14 m Öffnungsweite ergibt, ist vorgeschlagener Eingabewert.

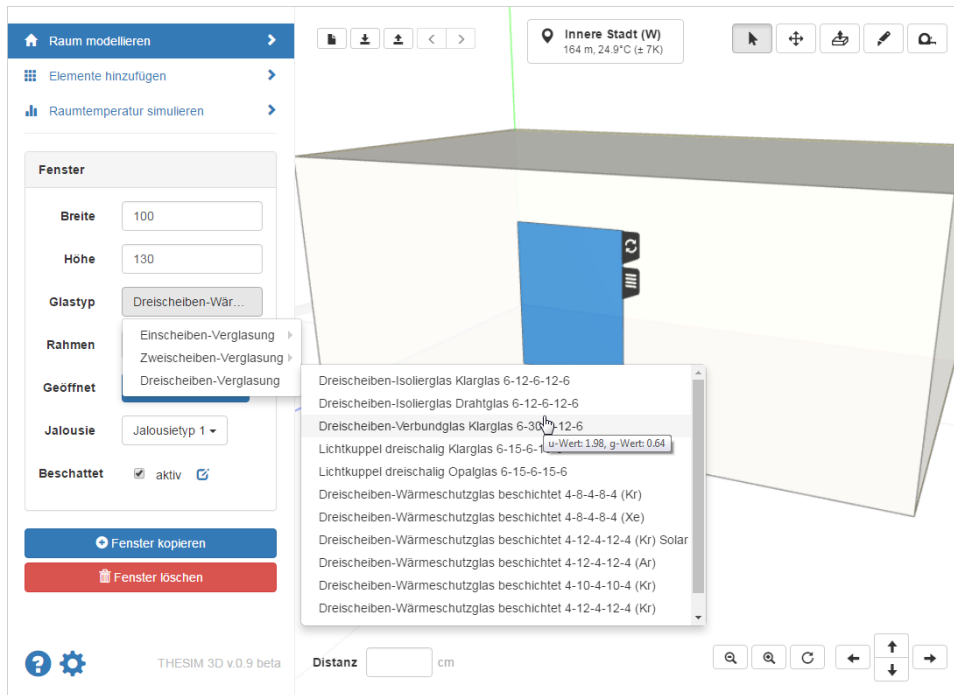


Abbildung 6.19: GUI: Festlegen des Glastypus.

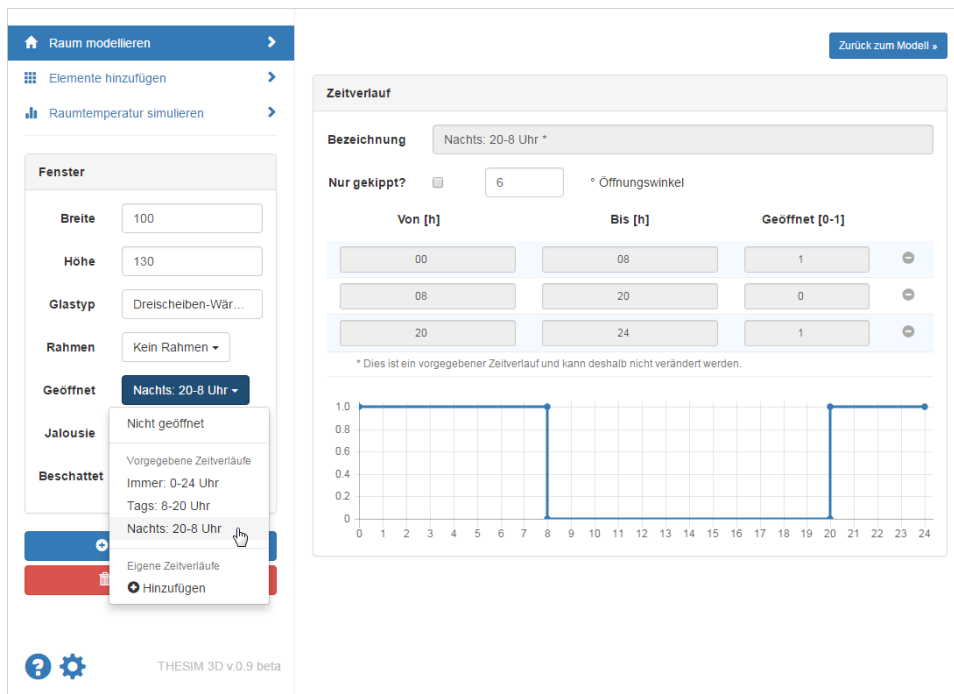


Abbildung 6.20: GUI: Festlegen des natürlichen Lüftungsverhaltens.

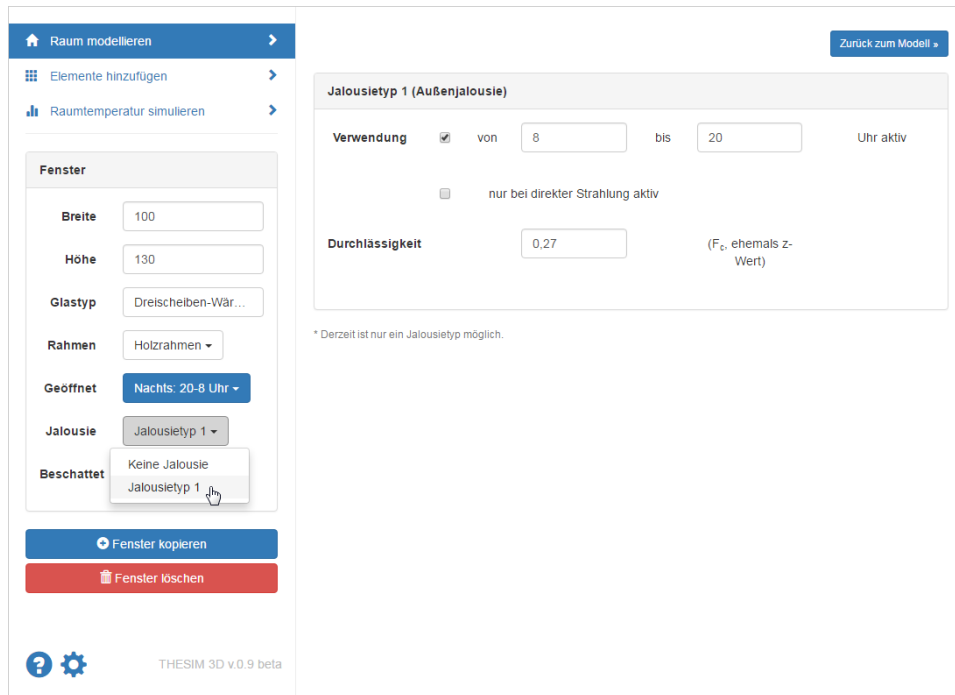


Abbildung 6.21: GUI: Festlegen der Jalousieparameter.

durch Sturz und Laibung, oder aber auch beispielsweise durch eine über dem Fenster auskragende Balkonplatte abbilden zu können, wird unter den Fenstereinstellungen die Festlegung einer sogenannten Leistenverschattung angeboten (siehe Abb. 6.23). Eine 2D und 3D-Skizze zur Erläuterung ist im Bereich dargestellt, um Missverständnisse auszuschließen.

Um auch aktive Zusatzelemente hinsichtlich der Raumnutzungstypen im Überblick zu haben, scheint bei Hinzufügen von einem Raumlüftungselement, Speicherbauteil (Möbel, Zwischenwand, o. ä.) oder internen Lasten wie Personen, Beleuchtung und Geräten, ein entsprechendes, farbiges Symbol im mittleren, unteren 3D-Bereich auf. Durch Maus-Klick auf das jeweilige Symbol erscheint – wie gewohnt – ein Kontext-Menü im linken Programmbereich (siehe Abb. 6.24). Am Beispiel des internen Wärmelasttyps „Personen“ wird die Funktionsweise exemplarisch erläutert: es gibt verschiedene Arten der Definition. Einerseits kann es eine personenbezogene Definition sein, bei der einfach die Anzahl der Personen im Raum angegeben wird, bei definierter Wärmeleistung einer Person (z. B. 90 W). Dies gilt beispielsweise für die vorgegebenen Zeitverläufe (immer, tags, nachts) als auch bei den selbst definierten Zeitverläufen, wo zu jeder Stunde die Anzahl der anwesenden

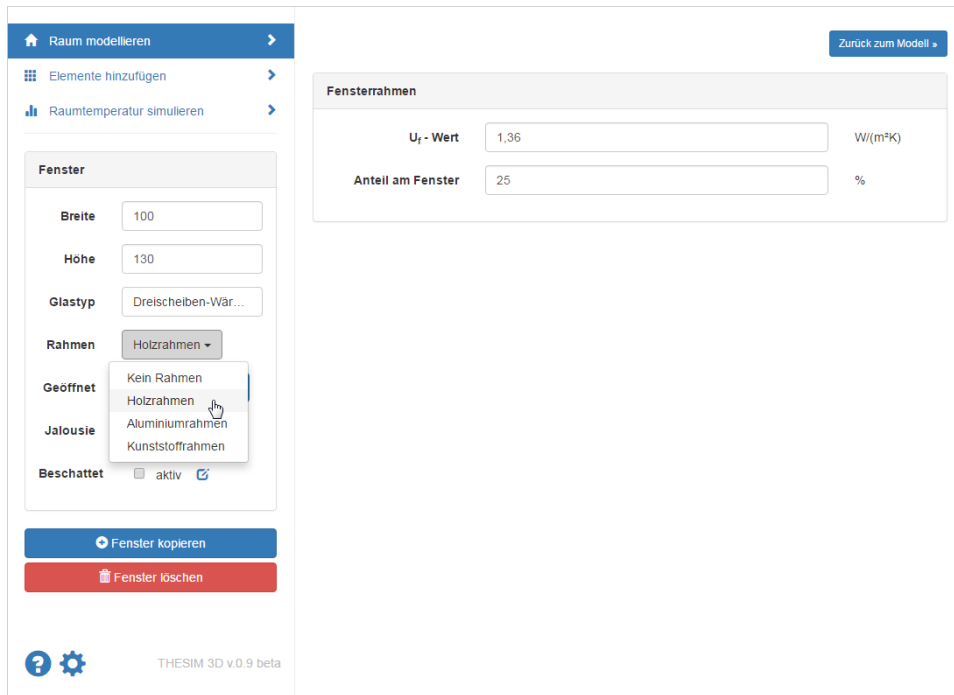


Abbildung 6.22: GUI: Festlegen des Fensterrahmentypus.

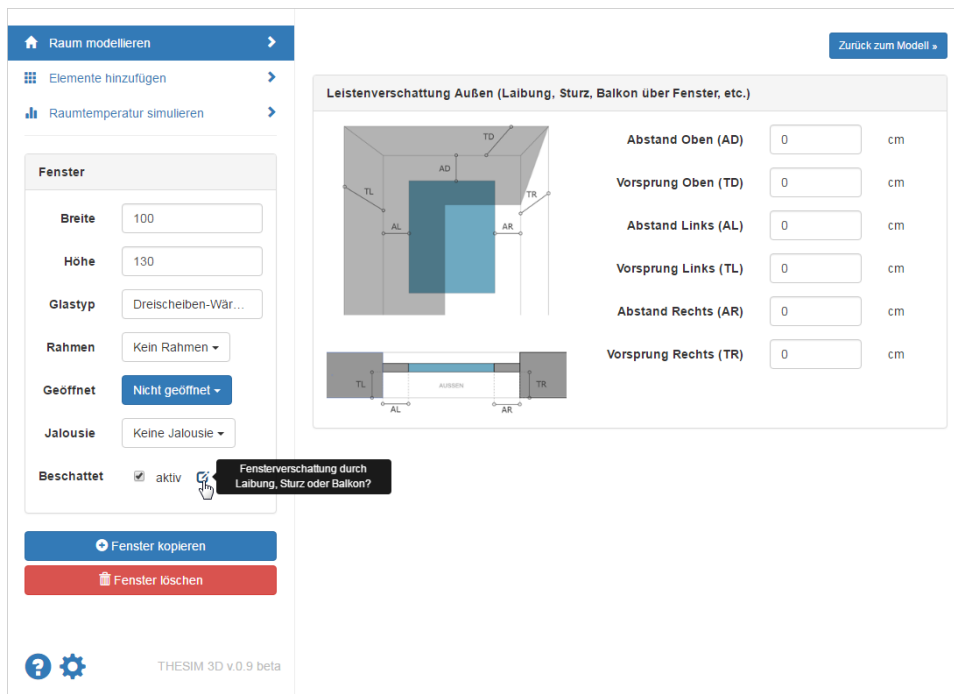
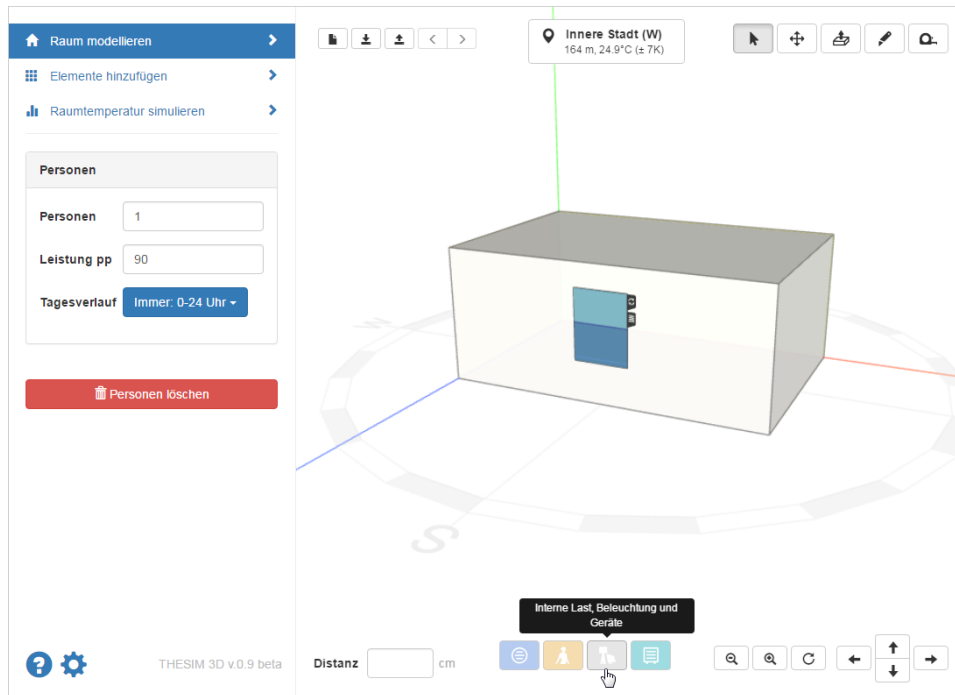


Abbildung 6.23: GUI: Festlegen der Leistenverschattung.

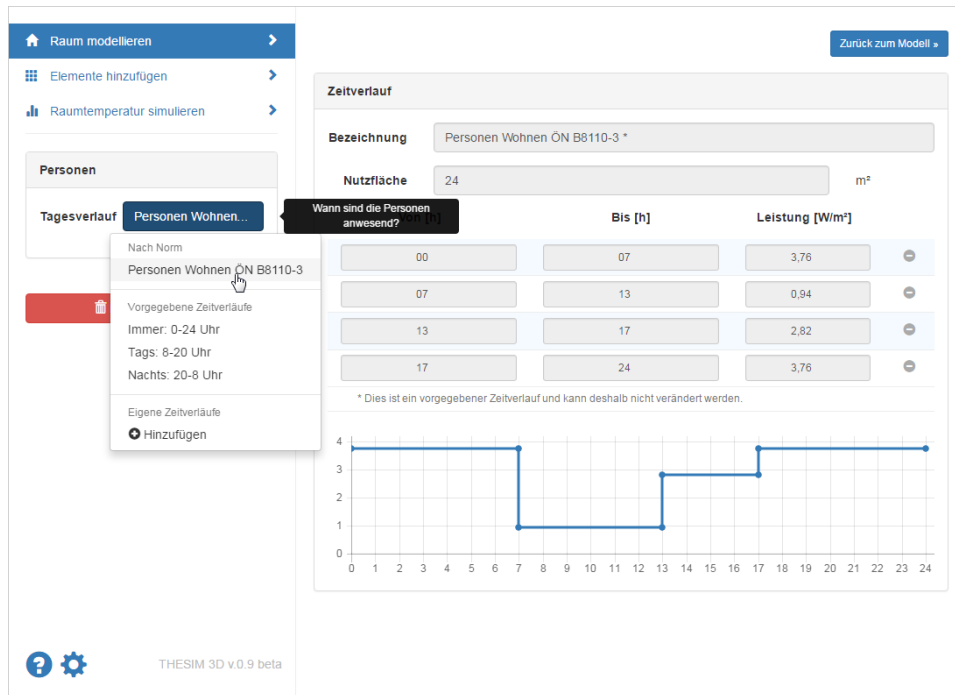


**Abbildung 6.24:** GUI: Anpassen der Eigenschaften hinzugefügter Elemente wie Personen, Beleuchtung und Geräte, Raumlüftung oder Speicherbauteile.

Personen angegeben werden kann. Die Norm [92] gibt die anzunehmenden inneren Lasten tabellarisch in stündlichen Werten vor, wobei hier spezifische Wärmeleistungen bezogen auf die Nutzfläche des betrachteten Raumes ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) angegeben werden. Die Oberfläche macht es für die BenutzerInnen aber sehr einfach. Man muss lediglich beim Zeitverlauf die Normvorgabe auswählen – das Tool ermittelt automatisch die Nutzfläche des Raumes und multipliziert die flächenspezifischen Werte, ohne dass auch nur eine Eingabe notwendig ist (siehe Abb. 6.25). Das einfache System zur Nutzung der Normvorgaben ist auch für die Wärmelasten durch Geräte als auch für mechanische Lüftung implementiert.

Einstellungen, die das gesamte Projekt betreffen, können – wie in Abbildung 6.26 dargestellt – durch Maus-Klick des Einstellungssymbols (Zahnrad) verändert werden. Die Parameter sind nochmals in zwei Abschnitte unterteilt, jene die in der Regel angepasst werden müssen, wie Projektbezeichnung<sup>19</sup>, die Farbe der Oberfläche der Außenbauteile oder der anzunehmende bautechnische Luftwechsel. Die weiteren

<sup>19</sup>Die Projektbezeichnung ist automatisch auch der Dateiname bei Speicherung des Projektes am lokalen Rechner.



**Abbildung 6.25:** GUI: Anpassen der Eigenschaften hinzugefügter interner Lasten (Personen): Einfaches Zuweisen normgemäßer Zeitverläufe.

Detaileinstellungen sollten für normgerechte Simulation nicht verändert werden. Diese umfassen die Tagesschwankung der Außentemperatur, die Bodentemperatur, den Trübungsfaktor nach Linke, den Diffusstrahlungsfaktor nach Reitz, die Reflexionszahl der Umgebung (Albedo), den absorbierten Strahlungsanteil auf der Außenseite der Gläser aufgrund von Verschmutzung, sowie die Wärmekapazität der Luft.

Zwischen jeder Änderung am Modell, spätestens aber zum Nachweis, kann die Simulation durch Maus-Klick auf den entsprechenden Hauptmenüpunkt gestartet werden. Der Außentemperaturverlauf sowie der gesuchte operative Raumtemperaturverlauf werden folgend in einem Diagramm mit viertelstündlichen Werten, sowie tabellarisch in stündlichen Werten dargestellt. Eine detaillierte Eingabedokumentation, sowie umfangreiche Informationen zur Temperaturverteilung und zu den Wärmeströmen in den Bauteilen können nach dem Akkordeon Prinzip im unteren Bereich des Ergebnisfensters auf- und zugeklappt werden (siehe Abb. 6.27).

The screenshot displays the settings interface of the THESIM 3D v.0.9 beta software. On the left, a sidebar contains navigation options: 'Raum modellieren', 'Elemente hinzufügen', and 'Raumtemperatur simulieren'. The main area is divided into two sections: 'Projekt Einstellungen' and 'Detail Einstellungen\*'. The 'Projekt Einstellungen' section includes fields for 'Projektbezeichnung' (Projekt\_1\_Sommer), 'Farbe äußere Oberfläche Außenbauteile' (mittel), and 'Fugenluftwechsel' (0,1 h<sup>-1</sup>). The 'Detail Einstellungen\*' section includes fields for 'Tageschwankung Außenlufttemperatur' (14 K), 'Bodentemperatur' (10 °C), 'Trübungs faktor nach Linke' (4,5), 'Diffusstrahlungsfaktor nach Reitz' (0,333), 'Reflexionszahl Umgebung (Albedo)' (0,2), 'Absorbierter Strahlungsanteil durch Schmutz' (5 %), and 'Wärme kapazität Luft' (1,2 kJm<sup>-3</sup>K<sup>-1</sup>). A 'Zurück zum Modell' button is located in the top right corner. At the bottom left, there is a help icon and a gear icon labeled 'Einstellungen', along with the text 'THESIM 3D v.0.9 beta'.

Abbildung 6.26: GUI: Projekt- und Detailsinstellungen.

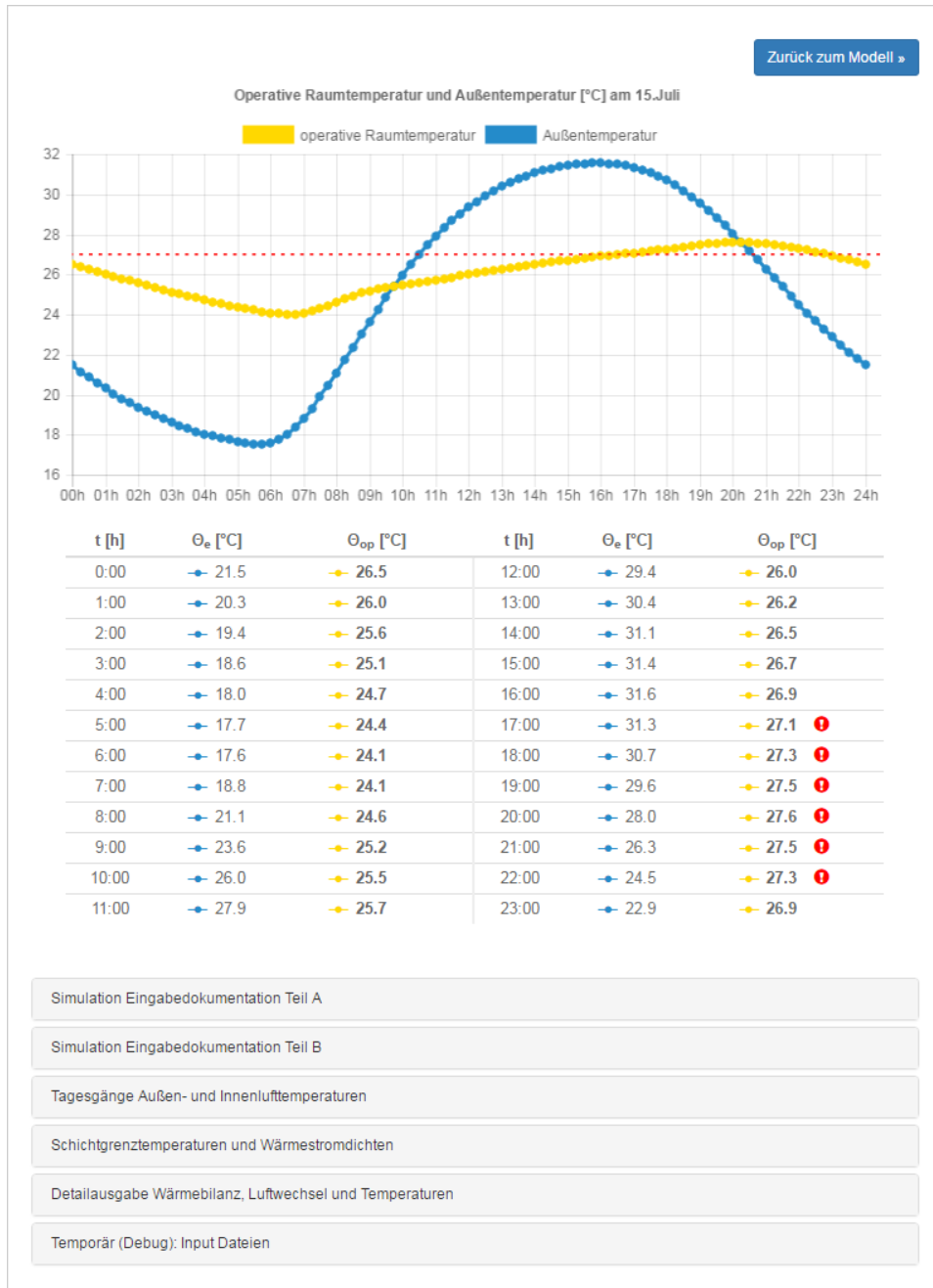
### 6.2.9 Programmiertechnischer Auszug

Eine detaillierte Dokumentation der Implementierung der Software wäre zu umfangreich, weshalb an dieser Stelle exemplarisch ein paar interessante Punkte eher systematisch als quellcodebasiert herausgegriffen werden.

#### 6.2.9.1 Geometrieerzeugung

In jedem Fall sollte für die BenutzerInnen die aufwändige und fehleranfällige Flächen-, Orientierungs- und Neigungsermittlung aller Hüllflächen des Raumes durch zeichnerische und visuelle Geometrieerzeugung abgenommen werden. Auf Basis der Erfahrungen aus der ersten Umsetzung des Tools als Java Applet (Abschnitt 6.2.2.3), in dem noch die Herangehensweise verfolgt wurde, die Geometrie im 2D-Bereich zu erstellen und lediglich eine interaktionslose 3D-Visualisierung zur Kontrolle zur Verfügung zu stellen, galt es für das endgültige Tool ein geeigneteres, reines 3D-basierendes Verfahren zur Geometrieerstellung zu implementieren. Die Nachteile des 2D-Verfahrens zeigten sich vor allem hinsichtlich einer einfachen und für die BenutzerInnen schnell verständlichen Methode der Generierung von Dachflächen, als auch





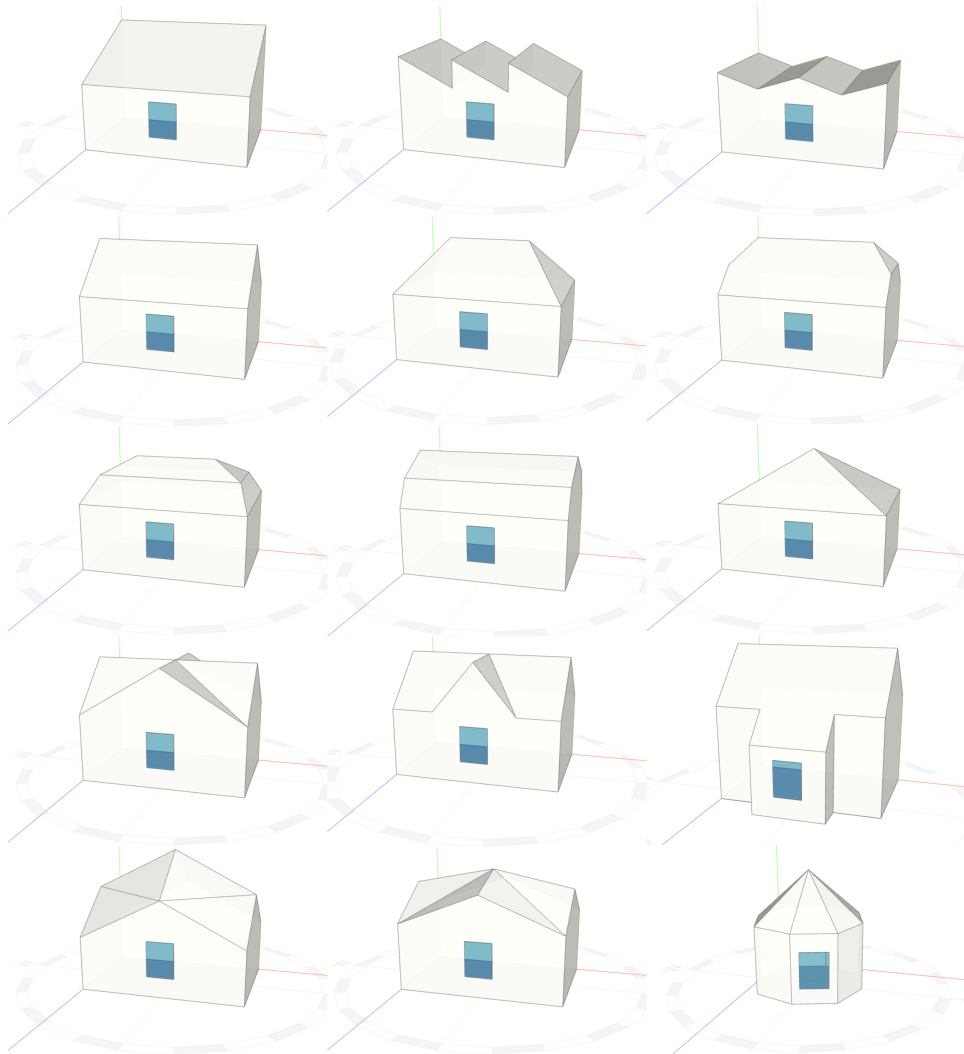
**Abbildung 6.27:** GUI: Ergebnis Hauptfenster mit Tagesverlauf der operativen Raumtemperaturen im Diagramm als auch tabellarisch dargestellt. Hervorhebung nicht normgemäßer Temperaturen durch Warnhinweis (rotes Ausrufezeichen). Aufklappbare Detailinformation im unteren Bereich.

von geeigneten Wandflächen. Aufgrund der Anforderungen an das Tool (siehe Abschnitt 6.2.1) und der daraus resultierenden Entscheidung für die Umsetzung als Webanwendung, musste eine 3D-Technologie für browserbasierte Anwendungen gefunden werden. Nach Recherche und Vergleich zahlreicher 3D-Bibliotheken fiel die Entscheidung auf die WebGL basierende 3D-Bibliothek Three.js (Abschnitt 6.2.4.3). Des weiteren galt es, eine geeignete und intuitive Möglichkeit der Volumensdefinition und Volumensänderung zur Verfügung zu stellen. Als weitaus einfachste Vorgangsweise für BenutzerInnen stellte sich heraus, von einem vordefinierten Raum (Quader) auszugehen und Flächen, Kanten und Punkte verschiebbar zu machen. Ein Raum von  $6 \times 4 \times 2,5 \text{ m}^3$  gilt als Ausgangsvolumen. In der Regel wird ein quaderförmiger Raum untersucht. Daher sollte dieser Standardfall am schnellsten definierbar sein. Beim Programmstart scheint ein Pop-Up-Fenster auf, in dem Länge, Breite und Höhe unter Vorgabe der genannten Standardwerte angegeben werden können. Mit nur einem Maus-Klick kann man demnach ein gewünschtes quaderförmiges Raumvolumen erstellen. Eine weitere Anforderung war es, die Änderbarkeit der Geometrie möglichst einfach zu gestalten. Eine sehr einfache und auch in diversen 3D-Modellierprogrammen umgesetzte Methode ist jene des Verschiebens und Extrudierens von Raumflächen, bzw. des Verschiebens von Raumkanten und Raumpunkten. Wird die Voraussetzung erfüllt, dass sich bei den Verschiebe- und Extrudiervorgängen die benachbarten Flächen anpassen, so ist das eine sehr effektive Art der Geometrieveränderung. Bei einem Quader werden demnach durch einfaches Verschieben einer Seitenfläche, vier benachbarte Flächen in ihrer Größe, evtl. auch Ausrichtung oder Neigung mitverändert. Nach jeder Veränderung der Raumgeometrie muss die Koplanarität aller Flächen überprüft werden, um nicht die Geometrie zu zerstören und damit die Gültigkeit der Objekte für das 3D-Rendering zu verlieren. Sollte eine Inkonsistenz auftreten, soll das Programm sofort darauf hinweisen und die Aktion rückgängig machen. Die Koplanarität wird z. B. über einen Algorithmus gelöst, bei dem für jede betroffene Hüllfläche durch drei Flächenpunkte eine virtuelle Ebene aufgestellt wird und für jeden weiteren Punkt dieser Fläche der Abstand zu dieser Ebene überprüft wird. Im Allgemeinen hat die 3D-Programmierung sehr viel mit Vektor- und Matritzenberechnungen zu tun. In der Regel basieren 3D-Bibliotheken hinsichtlich Flächensvisualisierungen immer auf der einfachsten Form, nämlich einem Dreieck. Ein Dreieck (Face) besteht dann aus drei Punkten (Vertices). Ein Rechteck besteht so aus zwei, ein Polygon aus mehreren Faces. Dabei ist die Reihenfolge der Vertices von großer Bedeutung um Vorder-, bzw. Rückseite des Faces definieren zu können. Die Erstellung von Polygo-

nen wird von der Grafikbibliothek in der Regel übernommen. Somit müssen nicht einzelne Dreiecke definiert werden, die Reihenfolge der Vertices bleibt aber bedeutend. Ebenso wird von der Bibliothek eine einfache Erstellung von 3D-Primitiven zur Verfügung gestellt, die bei der Entwicklung von *Thesim3D* jedoch keine Anwendung finden konnte. Jedes erstellte 3D-Objekt besitzt dann eine eigene Transformationsmatrix, die die Position, Rotation und Größe des Objektes im 3D-Raum spezifiziert.

Es wurde wegen der Datenhaltung als sinnvoll erachtet, jede Bauteilfläche als eigenes Objekt in der 3D-Szene abzubilden. Die Definition wäre über 3D-Punkte gewünscht. Die einfachste Möglichkeit in Three.js ein Polygon darzustellen ist mit der sogenannten `THREE.ShapeGeometry`. Diese benötigt zur Definition jedoch 2D-Punkte. Die erstellte `THREE.ShapeGeometry` kann dann über ihre Transformationsmatrix wie gewünscht im 3D-Raum positioniert werden. Die Verwendung des existierenden Objektes bringt einige Vorteile mit sich, z. B. die automatisierte Logik zur Aufteilung in Faces. Um davon also Gebrauch machen zu können, wurde folgende Methodik für jede Fläche umgesetzt: jeder 3D-Vertex der Fläche in korrekter Reihenfolge wird entlang eines bestimmten Vektors verschoben, um die Fläche im Nullpunkt des 3D-Raumes zu erhalten. Folgend werden alle Vertices um den Nullpunkt durch eine berechnete Rotationsmatrix auf eine der durch die Hauptachsen gespannten Flächen gedreht (z. B. X-Y). Wurde beispielsweise auf die X-Y Fläche rotiert, entfällt somit die dritte Dimension Z. Das `THREE.ShapeGeometry` Objekt kann aus den 2D-Punkten erstellt werden und dient als Basisgeometrie für ein Three.js 3D-Objekt, welches noch durch eine inverse Rotationsmatrix und den inversen Verschiebvektor an die korrekte Position im 3D-Raum gebracht wird. Für die Berechnung des im Zuge der Geometrieveränderungen oft benötigten Normalvektors wird als verlässlichste Art die Methode von Newell implementiert, die sich einer orthografischen Parallelprojektion bedient. Bei den geometrieverändernden Aktionen durch BenutzerInnen wird vorwiegend mit Abstandsberechnungen gearbeitet, um entsprechend verknüpfte Flächen mitanzupassen. Detaillierter soll an dieser Stelle nicht auf die 3D-Programmierung eingegangen werden – der Quellcode des *Thesim3D* Clients befindet sich im digitalen Anhang dieser Arbeit (siehe Anhang D).

Wichtige Anforderung an das Programm war es – u. a. aufgrund der z. B. in Wien häufig vorkommenden urbanen Nachverdichtung durch Dachgeschoßausbauten von Gründerzeithäusern – eine möglichst einfache Erstellung von Dachräumen zu bieten. Diese weisen erfahrungsgemäß eine erhöhte Überhitzungstendenz auf, der bereits in der Ent-



**Abbildung 6.28:** Zeile 1: Pultdach, Sheddach, Grabendach. Zeile 2: Satteldach, Walmdach, Krüppelwalmdach. Zeile 3: Mansarddach (Walmdach), Mansarddach (Giebedach), Zelt- oder Pyramidendach. Zeile 4: Kreuzdach, Zwerchdach, Schleppdach. Zeile 5: Rhombendach, Faltdach, Zelt- oder angenähertes Kegeldach.

wurfsphase entgegengewirkt werden sollte. Abbildung 6.28 belegt, dass mit *Thesim3D* ohne Probleme unterschiedlichste Dachformen erzeugt werden können.

### 6.2.9.2 3D-Interaktion

Der Umgang mit dem Programm wird sehr vereinfacht, wenn visuell und interaktiv gearbeitet werden kann. Bei Bewegung des Mauszeigers über einen Bauteil im 3D-Bereich wie eine Wand, einen Fußboden, eine Dachfläche, Fenster oder Türen, sollte es für die BenutzerInnen erkennbar sein (Mouseover-Effekt), dass sich hier weitere Informationen befinden. Bei eventuell folgendem Maus-Klick auf den entsprechenden Bauteil soll ein Kontext-Menü für die weitere Bearbeitung des jeweiligen Elements aufscheinen. Die Interaktion im 3D-Bereich ist durch die bekannte Methodik des sogenannten „Pickings“ umgesetzt. Auf Basis der aktuellen Kameraeigenschaften (vorwiegend Blickposition und -winkel in die 3D-Szene) und der Mausposition über dem 3D-Rendering kann eine 3D-Gerade (Ray) erzeugt werden, die definierte Objekte der 3D-Szene auf Schnittpunkte überprüft. Three.js stellt dafür das `THREE.Raycaster` Objekt zur Verfügung. Für alle geometrieverändernden Funktionen wie die entwickelten Verschiebe- und Extrusionsfunktionen, sowie die weiteren Werkzeuge in *Thesim3D* ist das Ermitteln von Schnittpunkten in der 3D-Szene grundlegend.

### 6.2.9.3 Flächen- und Volumenberechnung

Um die Bedienbarkeit des Tools weiter zu vereinfachen, wurde neben der automatisierten Flächenermittlung auch eine automatisierte Volumenberechnung integriert. Bei einem beliebigen 3D-Volumen ist das jedoch auf ersten Blick nicht trivial. Hierbei kommt jene Eigenschaft des 3D-Modells zum Tragen, wonach es als geschlossenes Mesh<sup>20</sup> angesehen werden kann. Die das Volumen umschließende Fläche besteht somit aus einer Vielzahl an Dreiecken. In der automatisierten Flächenermittlung kann somit die Fläche eines Bauteils einfach aus der Summe der Fläche der ihm zugeordneten Faces ermittelt werden: Die Fläche eines Faces ergibt sich aus der Hälfte des Kreuzproduktes zweier Seiten-Vektoren (korrekter Länge). Für die Volumenberechnung wurde eine Methode angewendet, die auf der Bilanzrechnung der Volumina der einzelnen Faces hin zum Nullpunkt (Tetraeder) beruht. Um ein korrektes Ergebnis zu erhalten wird ein geschlossenes Volumen und korrekte Ausrichtung der Faces (Reihenfolge der Vertices) vorausgesetzt, was in *Thesim3D* zu jeder Zeit gewährleistet werden kann. Die Methodik, die es erlaubt aus jedem beliebigen, geschlossenen 3D-Dreiecksnetz das entsprechende Volumen zu berechnen wird in [10] detailliert erläutert. Anhand folgender Formel wird das Volumen berechnet, wobei  $i$  für den Index des

---

<sup>20</sup>Ein Mesh ist ein Polygonnetz, in der Regel aber als Dreiecks- oder Vierecksnetz ausgebildet.

jeweiligen Faces steht und  $(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$ ,  $(x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})$  und  $(x_{i3}, y_{i3}, z_{i3})$  die Koordinaten der Vertices des Faces darstellen.

$$V_{total} = \left| \sum_{i=0}^I \frac{1}{6} (-x_{i3}y_{i2}z_{i1} + x_{i2}y_{i3}z_{i1} + x_{i3}y_{i1}z_{i2} - x_{i1}y_{i3}z_{i2} - x_{i2}y_{i1}z_{i3} + x_{i1}y_{i2}z_{i3}) \right|$$

#### 6.2.9.4 Schnittstelle zum Rechenkern

Der *Thesim3D* Client bildet die Modell- und Simulationsinformationen in anderer Weise als der Simulationskern Geba V.10 ab. Um nicht eine weitere Beschreibung dieser Informationen zum Datenaustausch einzuführen (z.B. XML), erscheint es sinnvoll, im Fall eines Berechnungswunsches die gesamte Simulationsinformation für Geba in Form von Fortran-Nomenklatur lesbar bereits direkt im Client zu erstellen und an das Webservice zu senden. Eine 138-seitige Schnittstellenbeschreibung [70] wurde hierfür erstellt.

Um den Simulationskern nicht dem Client direkt zur Verfügung stellen zu müssen, was zudem den Nachteil einer zusätzlichen clientseitigen Programminstallation mit sich bringen würde, läuft der Rechenkern ausgelagert auf einem Server, gekapselt von einem Java Webservice. Der Simulationskern besteht derzeit aus einer Programmkette von sieben Rechenprogrammen. Zum Teil benötigen diese Programme Eingabedaten, die als Dateien zur Verfügung stehen müssen. Das Webservice generiert diese Eingabedateien aus den Informationen, welche es von dem *Thesim3D* Client zugesandt bekommen hat. Nach Plausibilitätsprüfung der übermittelten Inhalte gilt es die Programme seriell in Prozessen auszuführen, auf deren Output zu warten, temporäre Dateien zu löschen, ggf. erfolglose Prozesse sauber zu terminieren und entsprechende Fehlermeldungen an den Client zurückzusenden. Da die Webseite mit der Client-JS-Logik und das Webservice zwar auf der gleichen Maschine und auch mit gleicher IP-Adresse, jedoch unter einem anderen Port zu erreichen sind, wird die Same-Origin-Policy<sup>21</sup> (SOP) wirksam. Server und Client müssen dementsprechend konfiguriert werden, um solche Cross-Domain-Requests zu ermöglichen. Auch auf Seiten des Simulationskerns mussten Änderungen vorgenommen werden. Dieser erzeugt in der Originalversion während der Simulationsprozesse

<sup>21</sup>SPO ist ein Sicherheitskonzept, das clientseitigen Skriptsprachen wie im gegebene Fall JavaScript untersagt, auf Objekte zuzugreifen, die von einer anderen Webseite stammen oder deren Speicherort nicht der ursprünglichen Herkunft entspricht und kann damit vor Angriffen auf Server schützen.

temporäre Dateien mit fixierten Dateinamen, was eine parallele Ausführung bei Zugriff vieler Clients unmöglich macht. Entsprechende I/O Operationen mussten umprogrammiert werden.

### 6.2.10 Umfrage

Vor der Freischaltung von *Thesim3D* sollte anhand der Rückmeldungen aus einer Gruppe ausgewählter Testpersonen zum einen herausgefunden werden, ob der intendierte Ansatz einer selbsterklärenden, spielerisch zu handhabenden Programmoberfläche auch in den Augen der Probanden gelungen ist. Zum anderen sollten die Rückmeldungen in eine letzte Überarbeitung von *Thesim3D* vor der Veröffentlichung einfließen. Es wurden dabei 50 ArchitektInnen, BauingenieurInnen und BauphysikerInnen in Österreich, Deutschland und der Schweiz kontaktiert und gebeten, Zeit für das Testen von *Thesim3D* zu erübrigen und anschließend anhand eines Online Fragebogens<sup>22</sup> Rückmeldung zu geben. Von den 50 Anfragen wurden 25 durch vollständig ausgefüllte Fragebögen beantwortet. Unter den 25 Probanden befanden sich 13 ArchitektInnen, 9 BauphysikerInnen und 3 BauingenieurInnen.

Der erste Teil des Fragebogens umfasst zehn schnell zu bewertende Aussagen für eine allgemeine Auswertung der Usability anhand eines anerkannten Verfahrens, das in weiterer Folge nach [8] und [104] beschrieben wird. Der zweite Teil des Fragebogens umfasst weitere Bewertungen, aber auch offene Fragen, um *Thesim3D*-spezifisch Verbesserungsmöglichkeiten oder ggf. Probleme orten zu können.

Eine quantitative Maßnahme zur Messung der Usability einer Anwendung ist das „System Usability Scale“ (SUS) Verfahren, eine 1986 von John Brooke entwickelte sogenannte Quick-and-dirty-Methode, die heute zu den etablierten und anerkannten Verfahren in der Nutzerforschung gehört. Mithilfe eines einfachen Fragebogens, der aus insgesamt zehn schnell zu bewertende Aussagen auf Basis von Likert-Skalen mit je fünf Optionen besteht, kann ermittelt werden, wie benutzerfreundlich eine Software wahrgenommen wird. Der SUS-Fragebogen enthält fünf positiv und fünf negativ formulierte Aussagen zur Usability des zu bewertenden Systems. Brooke schlägt folgende zehn Aussagen vor:

1. Ich kann mir sehr gut vorstellen, das System regelmäßig zu nutzen.
2. Ich empfinde das System als unnötig komplex.
3. Ich empfinde das System als einfach zu nutzen.
4. Ich denke, dass ich technischen Support brauchen würde, um das System zu nutzen.

---

<sup>22</sup>Zur Erstellung des Online Fragebogens wurde die Umfrage Funktion von Google Forms verwendet.

5. Ich finde, dass die verschiedenen Funktionen des Systems gut integriert sind.
6. Ich finde, dass es im System zu viele Inkonsistenzen gibt.
7. Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Leute das System schnell zu beherrschen lernen.
8. Ich empfinde die Bedienung als sehr umständlich.
9. Ich habe mich bei der Nutzung des Systems sehr sicher gefühlt.
10. Ich musste eine Menge Dinge lernen, bevor ich mit dem System arbeiten konnte.

Diese Kategorien werden im Standardverfahren mit Werten von 0 bis 4 kodiert. Dabei hängt die Kodierung jeweils von der Formulierung ab: Bei positiv formulierten Vorgaben erhält die Antwort „volle Zustimmung“ den Wert 4 und eine rundweg ablehnende Antwort den Wert 0. Bei negativ formulierten Vorgaben wird die Antwort „volle Zustimmung“ mit 0 kodiert, eine vollständig ablehnende Antwort erhält den Wert 4.

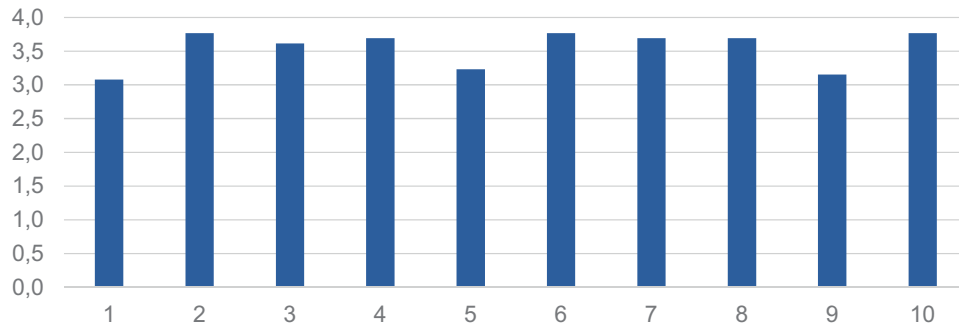
Aus den Ergebnissen des SUS-Fragebogens errechnet sich ein sogenannter SUS-Score, der eine Ausprägung zwischen 0 (schlechteste vorstellbare Benutzerfreundlichkeit) und 100 (beste vorstellbare Benutzerfreundlichkeit) annehmen kann: Bei der Auswertung des Fragebogens werden die ermittelten Zahlen addiert (0 - 40) und die Summe anschließend mit 2,5 multipliziert. Aus den Ergebnissen der Testpersonen wird schließlich aus allen Fragebögen ein durchschnittlicher SUS-Score ermittelt. Eine Befragung nach dem SUS-Prinzip gibt aber keine Erkenntnisse darüber, welche Usability-Probleme vorliegen, weshalb wie bereits erwähnt in einem zweiten Teil der Umfrage mit Fragen konkret darauf Bezug genommen wird.

Die Hauptzielgruppe des Tools sind ArchitektInnen, weshalb genaueres Augenmerk auf das Ergebnis dieser Testpersonengruppe gelegt werden soll. Abbildung 6.29 zeigt die Durchschnittswerte der Bewertung von ArchitektInnen hinsichtlich der 10 Aussagen. Abbildung 6.30 zeigt das Gesamtergebnis des SUS-Scores der Zielgruppe der ArchitektInnen, die 88,65% ergibt, womit bereits in dieser ersten Version die Benutzerfreundlichkeit von *Thesim3D* als „exzellent“ einzustufen ist. Das Gesamtergebnis aller Probanden ergibt einen SUS-Score von 83,1% und ist damit immer noch als „sehr gut“ zu bewerten.

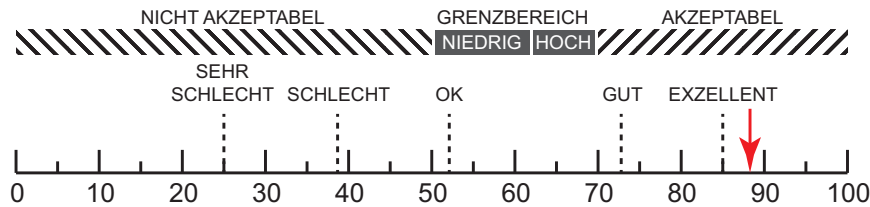
Der zweite Teil der Umfrage umfasste folgende Fragen:

1. Ist es verständlich, dass ein kritischer Raum untersucht wird und nicht ein ganzes Gebäude?
2. Gibt es Bereiche, die Sie als umständlich empfunden haben?
3. Wie kommen Sie mit der Geometrie-Erzeugung zurecht?





**Abbildung 6.29:** SUS-Score der Hauptzielgruppe „ArchitektInnen“ hinsichtlich der 10 Aussagen des SUS-Fragebogens.



**Abbildung 6.30:** Durchschnittlicher SUS-Score der Hauptzielgruppe „ArchitektInnen“.

4. Vermissen sie eine Funktionalität?
5. Wäre Ihnen neben der Geometrierzeugung per Maus eine per Tastatureingabe wichtig?
6. Was wären aus Ihrer Sicht interessante nächste Erweiterungen?
7. Wie bewerten sie die Simulations-Geschwindigkeit gegenüber einem Zeitschrittverfahren?
8. Ist die Ergebnis-Darstellung der Simulation verständlich?
9. Wie bewerten Sie die detaillierte Eingabedokumentation?
10. Wie bewerten Sie die Tauglichkeit für den Einsatz in der Lehre?
11. Haben sie Anregungen / Verbesserungsvorschläge?

Vor allem aus dem zweiten Umfrageteil konnte umfangreiche Information gewonnen werden, die in einer To-Do-Liste zusammengefasst wurden und als Basis für folgende Überarbeitungen von *Thesim3D* dienen und zum Teil im folgenden Abschnitt 6.2.11 angeführt werden.

### 6.2.11 Ausblick

Das entwickelte Online-Tool *Thesim3D* kann bereits sehr viele Einflussfaktoren hinsichtlich des sommerlichen Verhaltens eines Raumes

abbilden. Eine Erweiterung des Funktionsumfangs, die als wichtig eingestuft wird, ist die Verschattung des Raumes (speziell der transparenten Gebäudehülle) durch Objekte aus der Umgebung, beispielsweise eines Nachbargebäudes. Testalgorithmen wurden bereits für das Sketch-Up Plugin (Abschnitt 6.2.2.1) umgesetzt und sind für den nächsten Entwicklungsschritt von *Thesim3D* geplant. Über vektorbasierte Berechnungen wird der stündliche Verschattungsanteil durch den standortbezogenen Sonnenvektor für jedes Fenster automatisiert ermittelt und dem Simulationskern Geba übermittelt. Eine große Bereicherung die durch *Thesim3D* entsteht, ist die einfache Analyse unterschiedlicher Varianten. Dies sollte in einer künftigen Erweiterung noch vereinfacht werden, in der Ergebnisse verschiedener Varianten in Diagrammen überlagert und somit noch besser verglichen werden können.

Der Simulationskern Geba ist eine thermisch dynamische Simulationssoftware, mit der weitaus mehr simuliert werden kann als zur Zeit mit *Thesim3D* abgebildet wird. Durch Ändern der Fragestellung weg von den operativen Raumtemperaturen hin zu Wärme- bzw. Kühlleistung, könnte für Räume, die durch passive Maßnahmen allein nicht ausreichend kühl gehalten werden können, auch die zur Gewährleistung angenehmer Temperaturen erforderliche sensible Kühlleistung ermittelt werden.

Einen Schritt weiter in Richtung Wärmeleistung gedacht, könnte parallel zu *Thesim3D* Sommerfall auch eine weitere Webapplikation in gleichem, einfachen und intuitiven Stil für die Simulation des Wärmebedarfs an einem kalten Wintertag entwickelt werden: *Thesim3D* Winterfall. Spielerisch könnte so die Heizleistung von Räumen ermittelt, gegebenenfalls reduziert und auf Basis dieser Ergebnisse Heizkörper dimensioniert werden.

Der Simulationskern Geba ist auch für Mehrzonenmodelle ausgelegt. Das bedeutet, dass *Thesim3D* in einem weiteren Entwicklungsschritt auch für Mehrzonensimulationen erweitert werden könnte, was eine thermische Simulation mehrerer Räume eines Gebäudes mit unterschiedlichen Bedingungen (Nutzung, Randbedingungen, etc.) erlauben würde.



## Kapitel 7

# Optimierung eines Entwurfes



Abbildung 7.1: Gewähltes Optimierungsobjekt für *Thesim3D*.

Als Demonstrationsobjekt zur Optimierung des sommerlichen Raumverhaltens mit *Thesim3D* soll der Entwurf eines Gebäudes mit Wohnnutzung, wie in Abbildung 7.1 dargestellt, dienen. Das Galeriegeschoß, im Grundriss in Abbildung 7.2 dargestellt, zeigt auch die grundstücksbedingte Ausrichtung der Glasflächen in Richtung Osten und Süden. Standort des Gebäudes ist Velden am Wörthersee (Kärnten) auf einer Seehöhe von 440 m mit einer Normaußentemperatur (NAT-T13) von 21,8 °C. Gemäß ÖNorm B 8110-3 ist der Tagesverlauf der Außentemperatur für den „Norm-Sommertag“ derart zu konstruieren, dass dem Tagesmittelwert von 21,8 °C eine Schwankung von  $\pm 7$  K überlagert wird. Die Konstruktion ist in Massivholz (Brettsper Holz) ausgeführt. Die Bauteilaufbauten sind in Abbildung 7.5 bis 7.9 dargestellt. Die Außenwände weisen einen Wärmedurchgangswiderstand von 5,7 und das Dach von 6,0 m<sup>2</sup>K/W auf und erfüllen damit die behördlichen Anforderungen leicht. Als Fensterglas ist in dem Entwurf eine Zweifach-Wärmeschutzverglasung mit einem U-Wert von 1,3 W/(m<sup>2</sup>K) und einem g-Wert von 0,61 vorgesehen. Die Glasflächen sind von 8 cm dicken Holzrahmen umgeben. Die äußeren Oberflächen der Außenbauteile werden mit heller Farbe angenommen, was einer Absorptionszahl von 0,5 entspricht. Der Fugenluftwechsel wird mit 0,1 h<sup>-1</sup> festgesetzt. Der hygienische Luftwechsel (Abb. 7.10), die internen Wärmelasten durch Personen (Abb. 7.11) und auch jene durch Geräte (Abb. 7.12) verursacht, werden wie nach ÖNorm B 8110-3 vorgeschlagen festgelegt.

Die großflächige Verglasung lässt bereits kritisches Sommerverhalten erahnen. Bei genauer Südorientierung wird z. B. in behördlichen Ratgebern [116] empfohlen, maximal 40-50 % der Südfassade zu verglasen; im gegebenen Entwurf sind es 100 %. Mehr Glasfläche als die maximal empfohlenen 50 % sind laut dem Ratgeber kontraproduktiv, da sie im Winter höhere Energieverluste und im Sommer große Überwärmungsprobleme schaffen. Ist es möglich diesen kritischen Raum mit passiven Planungsmaßnahmen allein sommertauglich zu machen? Mit dem entwickelten Werkzeug soll die Ausgangssituation modelliert, analysiert und in weiteren Schritten so weit als möglich bezüglich Sommertauglichkeit optimiert werden. Wenn möglich, sollte der gegebene architektonische Entwurf und damit der Anteil an transparenter Fläche beibehalten werden. Die Optimierung soll also durch die Art des Glases, die Aufbauten der Bauteile, Sonnenschutz und ggf. Lüftungsmaßnahmen zu einem normgerechten sommerlichen Raumverhalten führen. Da die Nachtlüftung sehr viel bewirkt, wird versucht, zuerst ohne diese (nutzungsspezifische) Maßnahme das sommerliche Verhalten so gut als möglich zu verbessern. Nach dem Optimierungsschritt bezüglich der speicherwirksamen Masse des Raumes sollte auch die Lüftungsmaß-

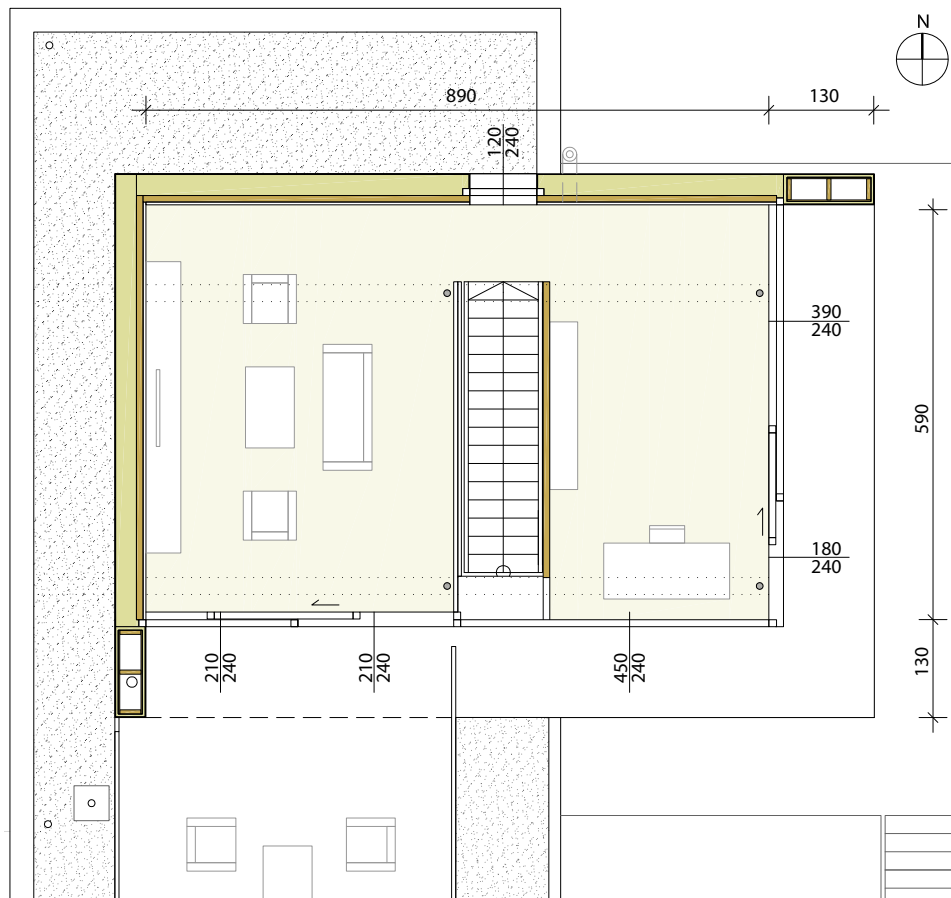


Abbildung 7.2: Grundriss Galeriegeschoss.

nahme noch effektiver werden und kann schlussendlich bei bereits anderwertiger Optimierung des Raumes die operative Raumtemperatur weiter senken und erhöhte Behaglichkeit schaffen.

Mit den beschriebenen Randbedingungen ergibt die Simulation mit *Thesim3D* einen stark überhitzten Wohnraum, der allerdings noch keine beweglichen Sonnenschutzmaßnahmen (z. B. Außenjalousie) oder Lüftungsmaßnahmen (abgesehen vom hygienischen LW) vorsieht. Der Verlauf der operativen Raumtemperatur als Ausgangslage zur Optimierung ist in Abbildung 7.13 dargestellt ( $\Theta_{max}=48,9\text{ °C}$ ).

Der Entwurf sieht bereits eine überlegt gewählte, fixe Verschattung der Glasflächen durch Auskrägung des Flachdaches um 1,3 m vor. Doch wie effektiv ist diese Maßnahme? Ohne der Fixverschattung durch die Dachauskrägung stellen sich in einer Hitzeperiode ohne zusätzliche Lüftungsmaßnahmen operative Raumtemperaturen bis zu  $68,0\text{ °C}$  ein. Bei

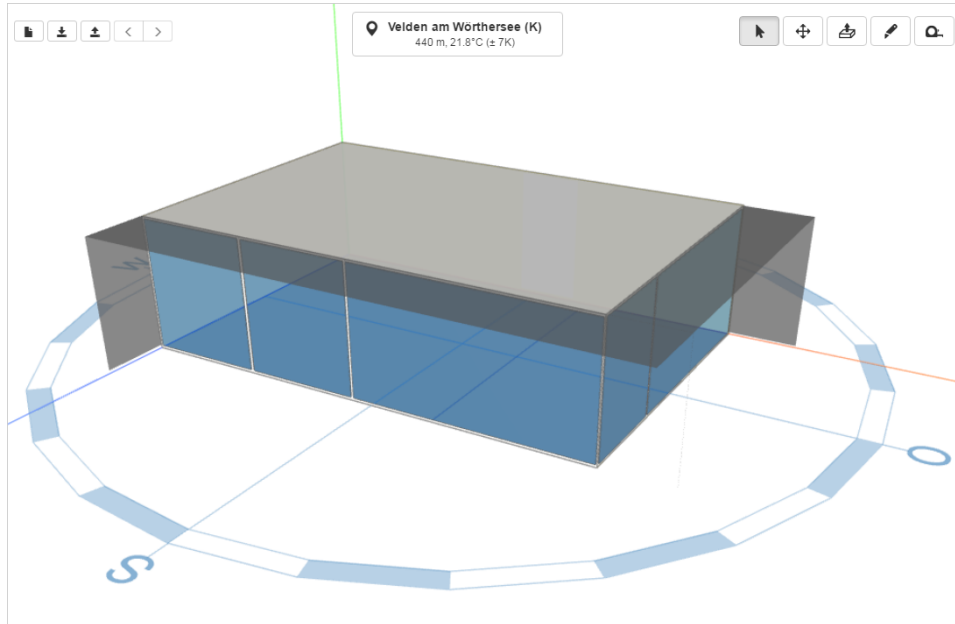


Abbildung 7.3: Abbildung des Galeriegeschoßes in *TheSim3D*.

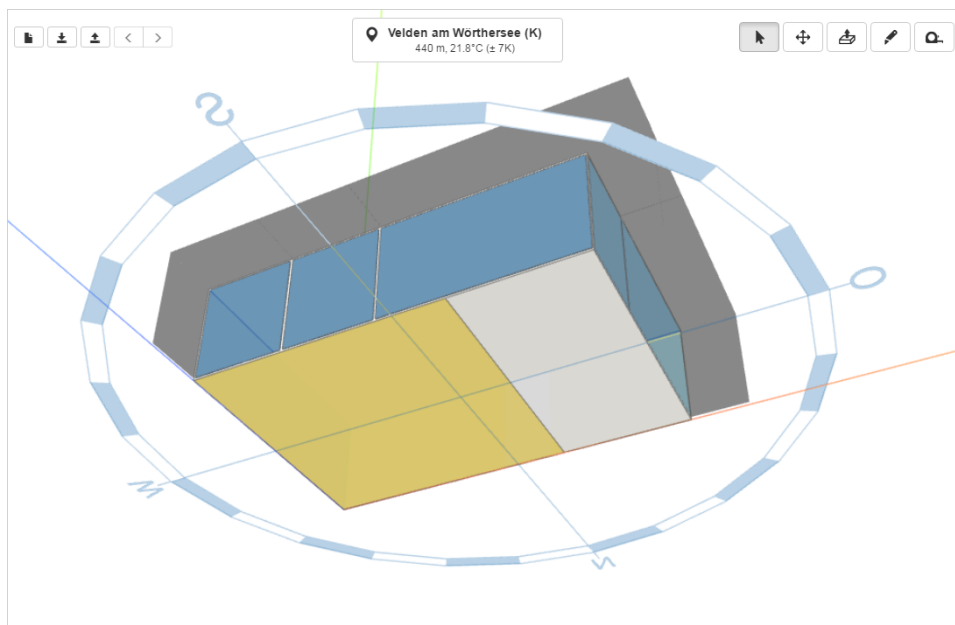


Abbildung 7.4: Abbildung des Galeriegeschoßes Ansicht unten.

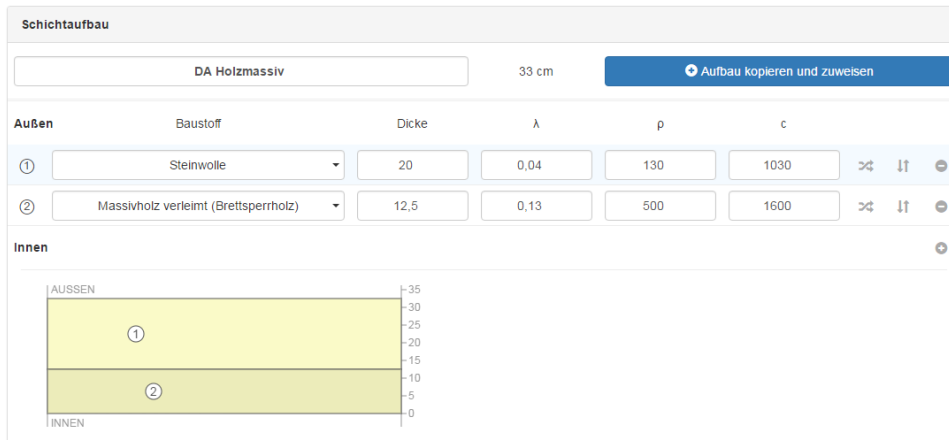


Abbildung 7.5: Dachaufbau.

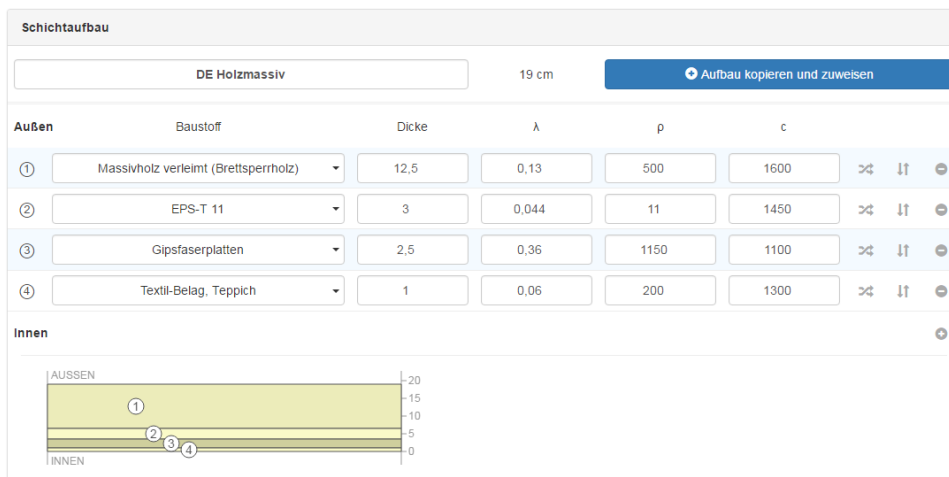


Abbildung 7.6: Deckenaufbau.

Auskrägung an der Ostseite steigt die operative Temperatur bis auf maximal  $63,2^{\circ}\text{C}$ . Bei Auskrägung nur an der Südseite beträgt der Maximalwert  $55,6^{\circ}\text{C}$ . Diese Erkenntnisse können in Sekundenschnelle in *Thesim3D* gewonnen werden.

Im ersten Optimierungsschritt wird die Auswirkung der Wahl eines geeigneten Glases auf das sommerliche Raumverhalten untersucht. Es werden alle Fenstergläser durch ein möglichst neutrales Zweischeiben-Sonnenschutzglas mit gleichem U-Wert von  $1,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  wie zuvor, jedoch einem g-Wert von 0,25, ersetzt. Diese Maßnahme reduziert die maximale operative Raumtemperatur um beinahe 13 K auf  $37,3^{\circ}\text{C}$ .

Bei so großer transparenter Hüllfläche im Vergleich zur Raumgröße



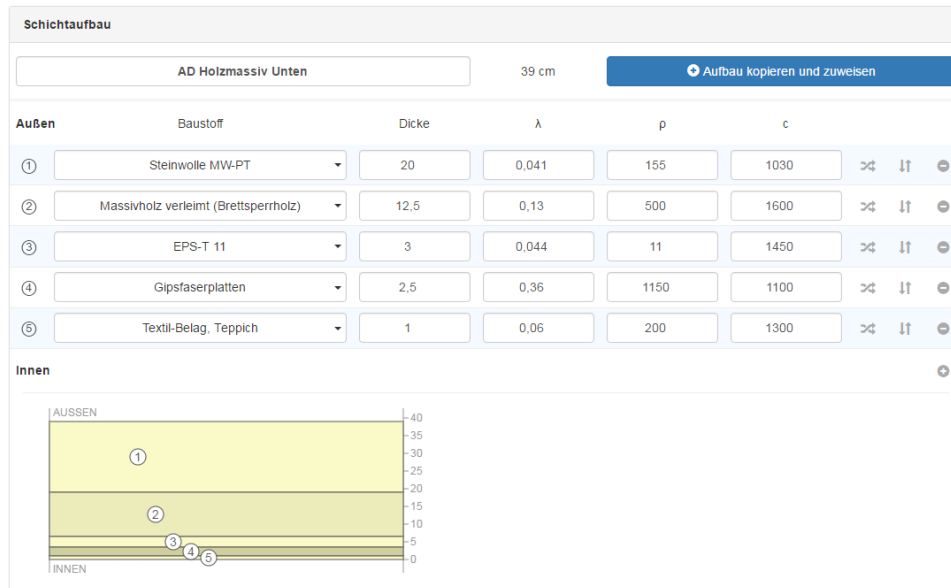


Abbildung 7.7: Außendeckenaufbau.

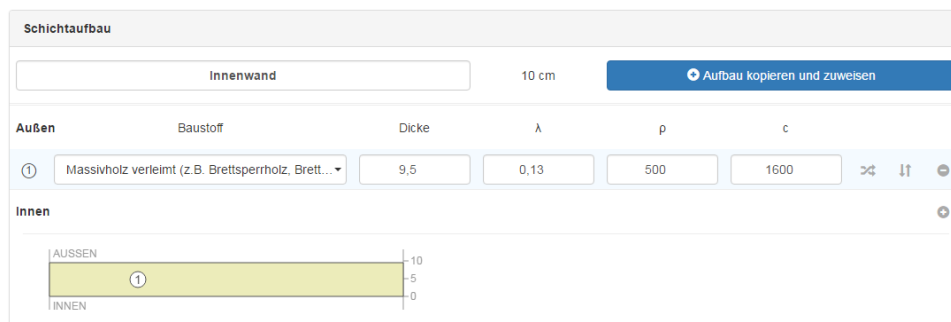


Abbildung 7.8: Innenwandaufbau.

ße, sind bewegliche Sonnenschutzmaßnahmen, wie z. B. Außenjalousien so gut wie unumgänglich. Der nächste Optimierungsschritt sieht Außenjalousien für die Verglasungen vor. Diese sind durch einen  $F_c$ -Wert von 0,27 gekennzeichnet, was einer Außenjalousie mit  $45^\circ$  Neigung der Lamellen entsprechen kann – auf diese Weise ist noch natürliche Belichtung ohne künstliche Beleuchtung möglich. Durch die Benutzung der Jalousie von 06:00 bis 20:00 Uhr in Hitzeperioden sinkt die maximale operative Raumtemperatur um weitere 7,3 K auf  $29,5^\circ\text{C}$ .

Der nächste Optimierungsschritt erhöht die speicherwirksame Masse des Raumes. Diesbezüglich wird der Bodenaufbau möglichst speicherwirksam ausgeführt. Statt des Trockenstrichs wird ein 8 cm dicker

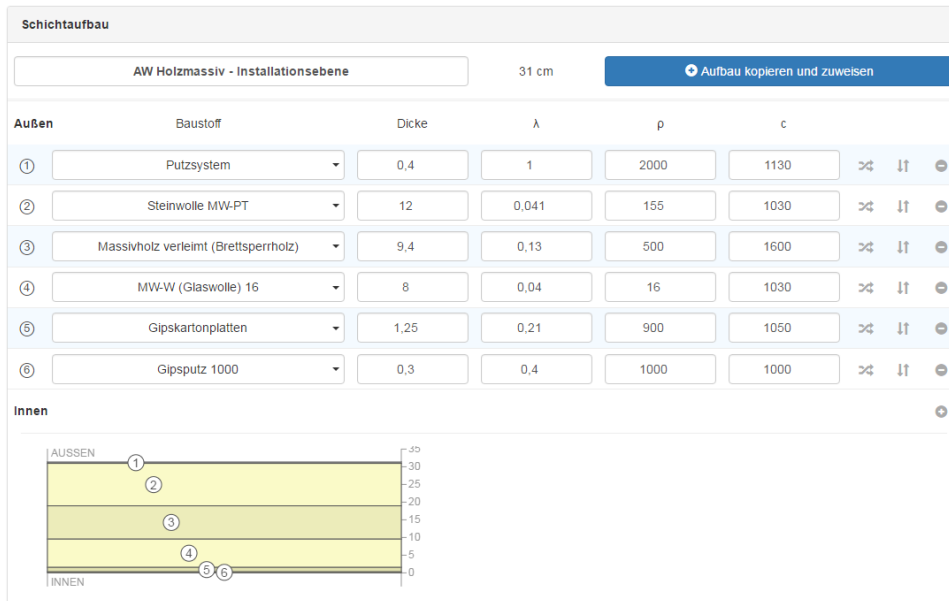


Abbildung 7.9: Außenwandaufbau.

Zementestrich ( $\rho=2000 \text{ kg/m}^3$ ) ausgeführt und als Belag ein Steinboden mit einer Dicke von 2 cm verwendet. Bei den Wänden wird anstatt

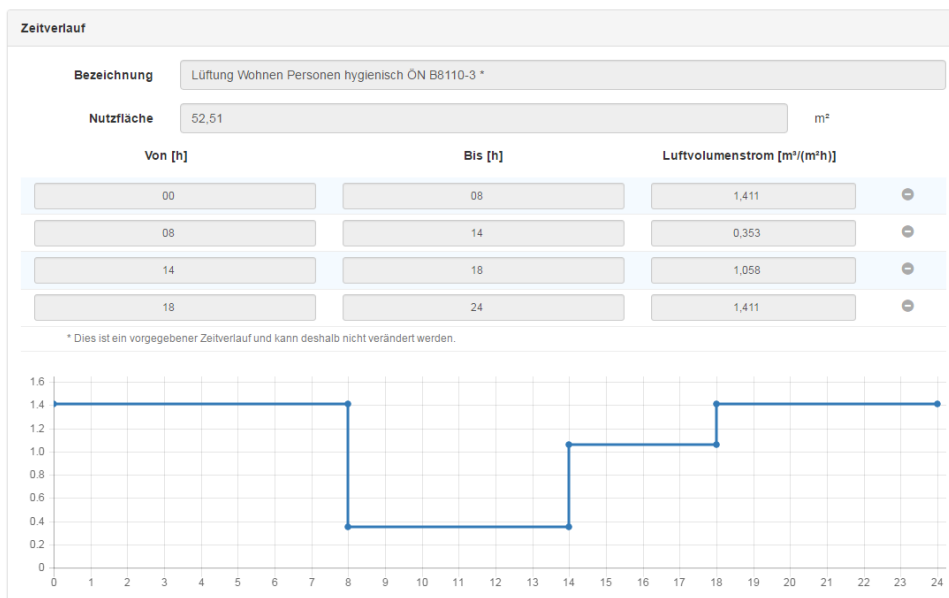
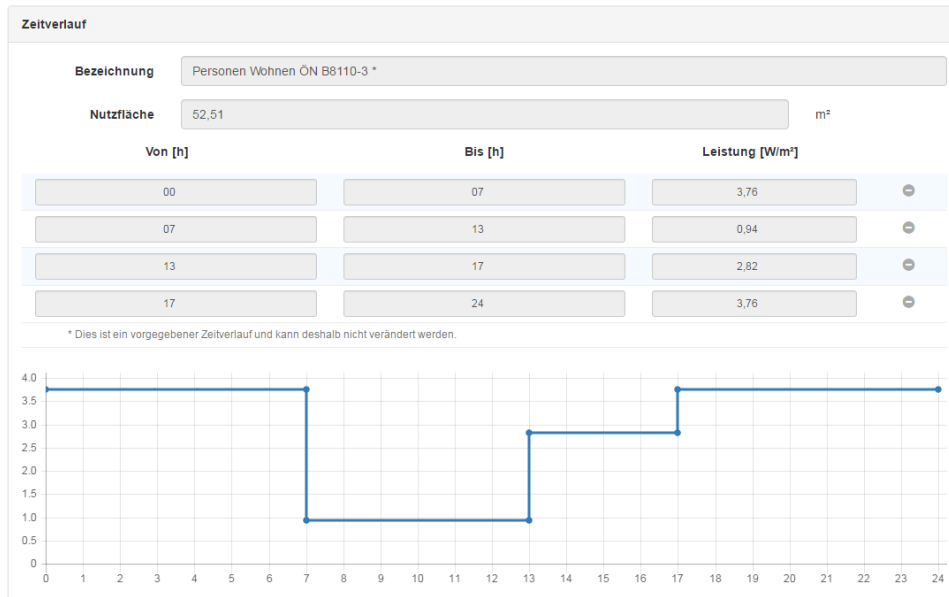


Abbildung 7.10: Hygienischer Luftwechsel nach ÖNorm B 8110-3.

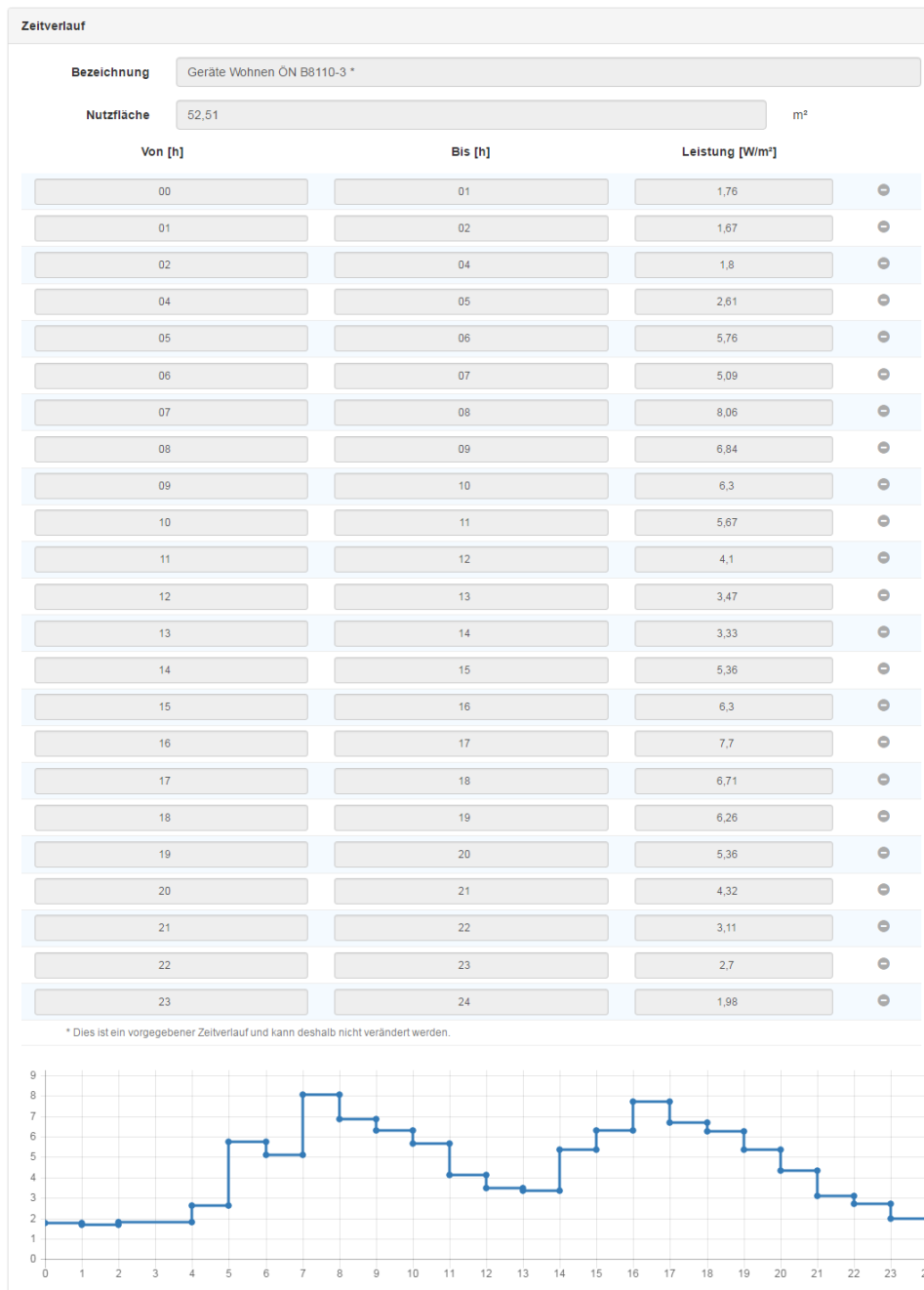


**Abbildung 7.11:** Interne Lasten durch Personen nach ÖNorm B 8110-3.

der Installationsschicht ein Lehmputz von 4 cm aufgetragen (der ggf. Wandheizung und -kühlung integriert haben könnte). Die nichttragende Innenwand wird – zwecks Erhöhung der Speichermasse – durch eine Lehmziegelwand ersetzt. Der Baustoff Lehm verbessert neben der thermischen Speichermasse auch das Raumklima durch seine feuchteausgleichende Wirksamkeit. Die Erhöhung der Speichermasse durch die leicht modifizierten inneren Bauteilschichten führt zu einer weiteren Senkung der maximalen operativen Raumtemperatur um beinahe 2 K auf 27,6 °C. Damit ist man laut Norm beinahe sommertauglich, wobei das Potential gezielter Lüftungsmaßnahmen noch nicht ausgelotet ist.

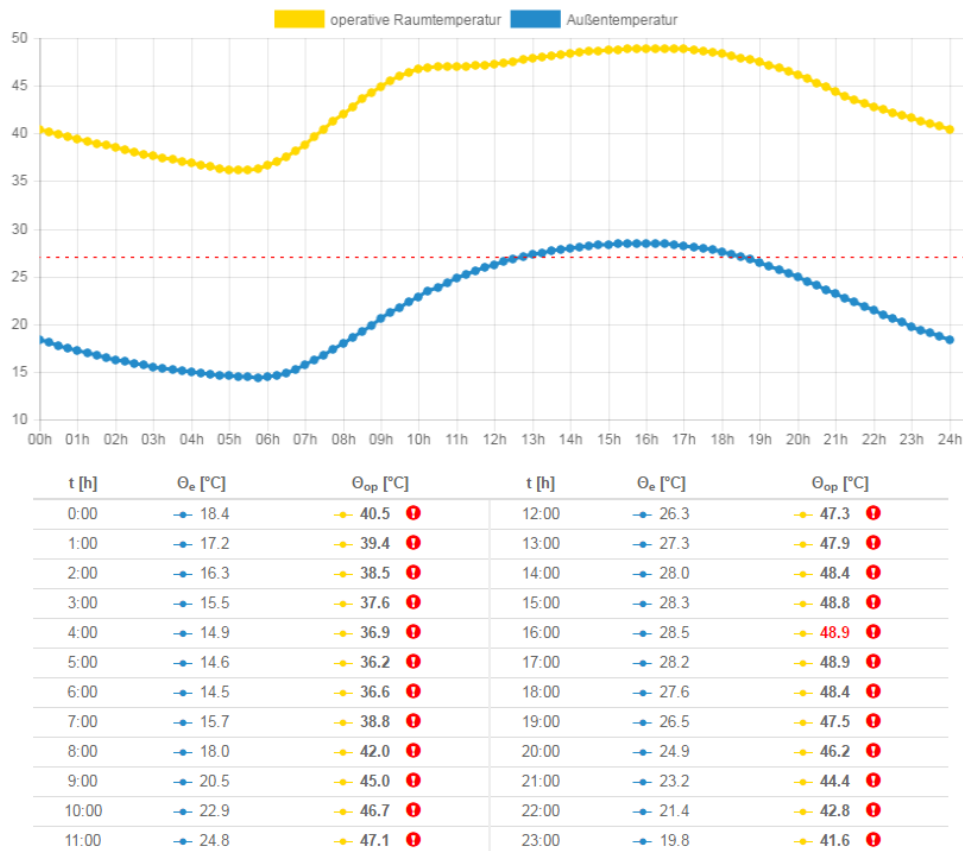
Bereits bei nächtlichem (20:00-08:00 Uhr) Kippen der südlich orientierten Glasschiebetüre ist die Sommertauglichkeit gemäß Norm erreicht. Die maximal auftretende operative Raumtemperatur von 26,4 °C tritt um 19:00 Uhr auf. Wird die Schiebetüre zu der Terrasse nachts gänzlich geöffnet, erreicht man auch in Hitzeperioden eine maximale operative Raumtemperatur von lediglich 22,9 °C. Der Verlauf der operativen Raumtemperatur mit den genannten Optimierungsmaßnahmen sowie Sonnenschutz und Nachtlüftung ist in Abbildung 7.14 dargestellt.

Können die nutzungsbedingten natürlichen Lüftungsmaßnahmen und die Verwendung der Außenjalousie bei strahlungsstarken Sommertagen als gesichert angenommen werden, könnte sogar auf die Verwendung von Sonnenschutzgläsern verzichtet werden. Wird von



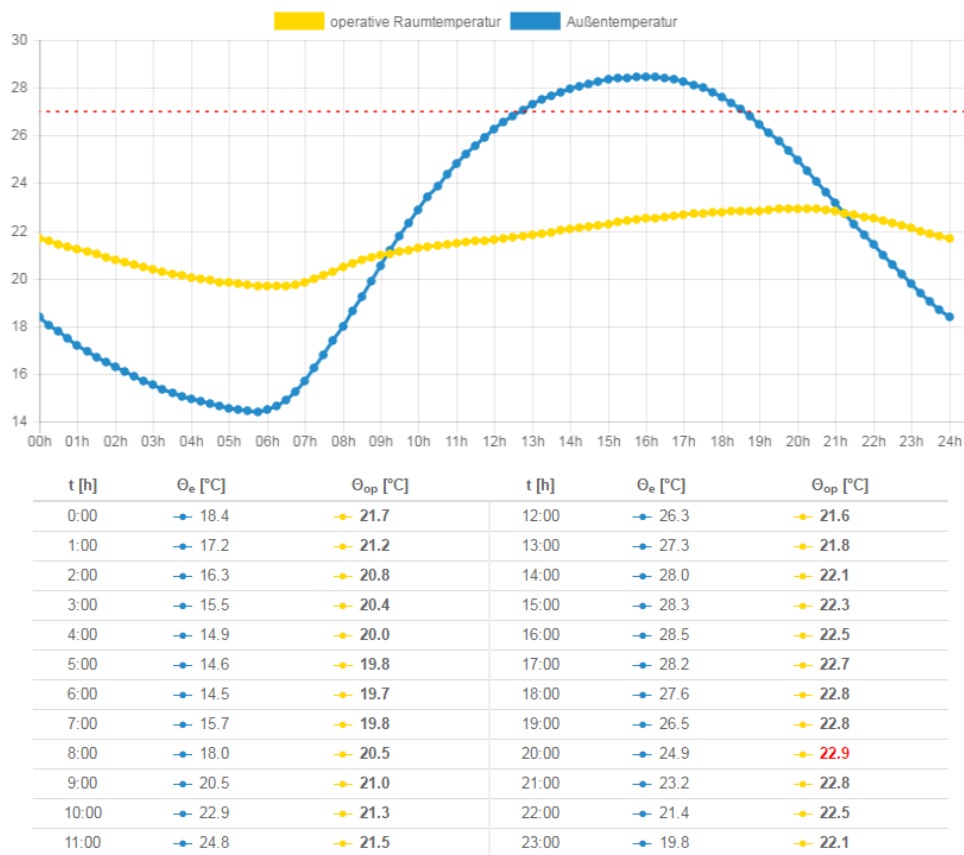
**Abbildung 7.12:** Interne Lasten durch Geräte nach ÖNorm B 8110-3.

dem Endergebnis der Optimierung inkl. der Lüftungsmaßnahmen und Außenjalousie (siehe Abb. 7.14) wieder auf die ursprünglich geplanten Gläser gegangen, so stellt sich eine maximale operative Raumtempera-



**Abbildung 7.13:** Verlauf der operativen Raumtemperatur bei der Ausgangslage.

tur von 24,5 °C ein und der Raum kann als sommertauglich eingestuft werden. Wechselt man jedoch gleichzeitig den Standort des Gebäudes auf das innerstädtische Gebiet von Wien, so erhöht sich die maximale operative Temperatur um 3,1 K, womit das thermische Raumverhalten nicht mehr der Norm entspricht. Dieser, so wie viele weitere in der Optimierung verwendete Einflussfaktoren, werden bei dem vereinfachten Normverfahren außer Acht gelassen, weshalb an dieser Stelle nochmals ausdrücklich die Empfehlung zur Verwendung des detaillierten Verfahrens gegeben wird.



**Abbildung 7.14:** Verlauf der operativen Raumtemperatur nach Optimierung.



## Kapitel 8

# Zusammenfassung und Erkenntnisse

Nicht nur in älteren Bestandsgebäuden, sondern auch in hochwärmege-  
dämmten Neubauten stellt sich im Sommer des Öfteren unbehagliches,  
zu warmes Innenraumklima ein. Die Gründe dafür sind zahlreich und  
werden im einführenden Teil der Arbeit detailliert beleuchtet, sowie in  
diesem abschließenden Kapitel kurz zusammengefasst. Im Allgemeinen  
wird dafür der bereits längere Zeit anhaltende Trend in der zeitge-  
nössischen Architektur, sich höherer transparenter Anteile in der Ge-  
bäudehülle und (aus Gründen der Material- sowie Kosteneffizienz) des  
Leichtbaus zu bedienen, verantwortlich gemacht. Auch die globale Er-  
wärmung rückt den Fokus nun vermehrt auf diese Problematik. Nicht  
zuletzt ist aber oft eine unzureichende Planung dafür verantwortlich,  
dass das Potential passiver Maßnahmen zur Schaffung eines akzeptab-  
len sommerlichen Raumverhaltens nicht ausgeschöpft und somit un-  
nötiger Kühlbedarf generiert wird.

Wesentlich wird es in Zukunft sein, Gebäude auch in Hinblick auf  
den sommerlichen Wärmeschutz zu optimieren und den Energieeinsatz  
für ein behagliches Sommerklima in den Gebäuden so klein wie mög-  
lich zu halten. In Anbetracht der Ursachen des Klimawandels muss  
dieses Ziel, wo immer möglich, ohne den Einsatz energieintensiver Kli-  
matisierung erreicht werden. Vor allem auch in dem Bewusstsein, dass  
das thermische Verhalten von Räumen unter hochsommerlichen, au-  
ßenklimatischen Bedingungen durch planerische (passive) Maßnahmen  
wesentlich beeinflusst werden kann.

Folgend werden die wichtigsten Erkenntnisse der Arbeit themenbe-  
zogen zusammengefasst.



## 8.1 Planung für ArchitektInnen

Eine wichtige Erkenntnis und auch Motivation für diese Arbeit war es, dass ArchitektInnen im Entwurfsprozess in Hinblick auf das sommerliche Gebäudeverhalten bisher keine geeignete Hilfestellung hatten. Bislang fehlen zweckmäßige Instrumente, die es erlauben auf für ArchitektInnen adäquate Art die Auswirkung planerischer Maßnahmen auf das sommerliche Raumverhalten aufzuzeigen und eine gelungene Optimierung des sommerlichen Wärmeschutzes nachzuweisen. Die Problematik wird in Abschnitt 1.1.3 detailliert beleuchtet und führt zu der Schlussfolgerung, dass die Überlegungen zum klimagerechten Bauen bereits in der Entwurfsphase stattfinden müssen. Viele Planungsentscheidungen, die zu diesem Zeitpunkt getroffen werden, haben einen wesentlichen Einfluss auf das sommerliche thermische Verhalten des Gebäudes und können nachträglich kaum oder nur mit erhöhtem Aufwand und Zusatzkosten geändert werden.

Das in Österreich überwiegend eingesetzte, vereinfachte Normverfahren der ÖNorm B 8110-3 [92], das in der Regel erst im Zuge einer behördlichen Einreichung zum Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes angewendet wird, führt zu keiner ausreichenden Planungssicherheit. Es ist somit von den realistischeren Ergebnissen und Möglichkeiten thermisch dynamischer Gebäudesimulationsprogramme weit entfernt. Gebäudesimulationsprogramme sind aber in der Regel in ihrer Handhabung zu komplex und (zeit-)aufwändig, um ArchitektInnen beim Entwurfsprozess zu unterstützen. Überdies sind die Lizenzkosten kommerzieller Simulationsprogramme für kleinere Planungsbüros finanziell schwer zu bewältigen.

Ziel dieser Arbeit war es, den PlanerInnen ein allgemein und kostenlos zugängliches Online-Tool zur Verfügung zu stellen. Dieses Ziel ist mit Abschluss dieser Arbeit erreicht. Mit *Thesim3D* liegt ein Simulationsprogramm vor, dessen Oberfläche selbsterklärend und spielerisch zu handhaben ist und dessen Ergebnisse aufgrund physikalisch tragfähiger Ansätze realitätsnah sind. Im Vergleich zu den derzeit verwendeten vereinfachten Verfahren erhöht *Thesim3D* die Planungssicherheit erheblich, wobei gleichzeitig der Eingabeaufwand sehr klein gehalten und die Fehleranfälligkeit reduziert wird. Den ArchitektInnen wird es so auf einfache Weise bereits in der Entwurfsphase möglich, bezüglich des sommerlichen Gebäudeverhaltens eine zielgerichtete Planung zu entwickeln. Die vielen und sich teilweise gegenseitig beeinflussenden Parameter hinsichtlich der sommerlichen Überwärmung können bestens auf den entsprechenden Entwurf angepasst und gleichzeitig die Sommer-tauglichkeit nachgewiesen werden. Im Hintergrund werden bauphy-

sikalisch korrekte Ergebnisse anhand einer thermisch dynamischen Gebäudesimulation erzeugt.

## 8.2 Einflussfaktoren

Abgesehen von der Klimaerwärmung, die in Abschnitt 1.1.2 behandelt wird, werden in Abschnitt 2.5 die Einflussfaktoren detailliert nach Themenbereichen sortiert aufgezählt, diskutiert und bewertet. Einige erkenntnisbringende Auszüge können wie folgt zusammengefasst werden:

- Es sind in erster Linie die äußeren klimatischen Bedingungen, die solaren Wärmeeinträge (vor allem über transparente Bauteile), die ggf. vorhandene Verschattung dieser Flächen, das Lüftungsverhalten, die internen Lasten im Raum sowie die Speichermasse der Bauteile, die das sommerliche Klima eines Raumes wesentlich beeinflussen. In der Regel entspricht die zuvor gewählte Reihung auch der Priorität hinsichtlich der Auswirkung auf die operativen Raumtemperaturen bei heutigen thermischen Standards von Außenbauteilen.
- Bei der Vielzahl an Einflussfaktoren ist es oft nicht zielführend, sich auf einzelne Parameter zu konzentrieren, viel mehr ist eine gesamtheitliche Betrachtung der Einflüsse wichtig. So beeinflussen sich z. B. der Energieeintrag, die Lüftung und die speicherwirksame Masse des Raumes gegenseitig und müssen aufeinander abgestimmt werden. Das wiederum ist projektspezifisch und kann nicht pauschal auf einfache Weise beurteilt oder quantitativ bewertet werden. Oft wird auch der Versuch unternommen, rein bauteilbezogenen Optimierungen zu unternehmen, doch auch das ist in keinem Fall zielführend – auch ein Raum mit speicherfähigen Bauteilen wird in Kombination mit hohem Fensteranteil und ungeeigneten Lüftungsverhalten überhitzen. Aus diesem Grund sind thermisch dynamische Simulationsprogramme, die eine gesamtheitliche Betrachtung erlauben, sehr wichtig hinsichtlich der Planungssicherheit und einer realistischen Abschätzung des sommerlichen Verhaltens.
- Ergebnisse verschiedener Untersuchungen aus der Literatur beziehen sich auf Messungen oder Simulationen unterschiedlich und speziell gearteter Räume, Bauteilaufbauten, Randbedingungen, Raumnutzungen, etc. und erschweren dadurch eine exakte Vergleichbarkeit. Sie weichen in den quantitativen Ergebnissen teilweise voneinander ab, kommen aber dennoch im Allgemeinen zu

relativ deckenden, bereits genannten Erkenntnissen.

- Es zeigt sich bei den Untersuchungen auch, dass nicht, wie vielfach angenommen, ausschließlich die Bauschwere entscheidend ist, sondern vielmehr die Beschattung der transparenten Gebäudehüllflächen und ein kühlungswirksamer Luftwechsel, wie er z. B. durch natürliche Nachtlüftung erzeugt wird. Darauf muss folglich bei allen Bauweisen – egal ob Holz, Ziegel oder Stahlbeton – geachtet werden und gleichzeitig können mit allen drei Bauweisen sommer-taugliche Gebäude der besten Klasse A++ nach ÖNorm B 8110-3 geplant und gebaut werden.
- Schwere Bauweise führt zu kleineren Tagesschwankungen der Raumtemperatur. Es muss jedoch dafür gesorgt werden, dass mittels gezielter Begrenzung der (solaren) Wärmeeinträge in den Raum und durch das Vorsehen guter Lüftungsmöglichkeiten der Tagesmittelwert der Raumtemperatur so niedrig liegt, dass die Vorteile der schweren Bauweise zum Tragen kommen. Generell ist anzumerken, dass bei gleicher thermischer Qualität der Außenhülle des Raumes die errechneten Tagesmittelwerte für Varianten, die sich nur in Hinblick auf die Bauweise unterscheiden, gleich sind. Die Bauweise beeinflusst den Tagesverlauf nur in dem Sinn, dass die Tagesamplitude mit wachsender Wärmespeicherfähigkeit der raumbegrenzenden Bauteile kleiner wird. Dies bedeutet u. a. auch, dass Räume, die aufgrund zu hoher Innenwärmen einen über 27 °C liegenden Tagesmittelwert aufweisen, durch Veränderung der Bauweise allein nicht sommertauglich gemacht werden können. [65]
- Die bereits einfühend bei der Wärmespeicherung (siehe Abschnitt 2.4) erwähnte Phasenverschiebung und Temperaturamplitudendämpfung, die oft im Zuge der Bauschwere für Diskussion sorgen, sind zwar Bauteileigenschaften, sagen aber nichts über den dahinterliegenden Raum aus. Bei heutigen Konstruktionen ist der Einfluss dieser Größen ohnehin sehr gering, da sich das Wärmeschutzniveau wesentlich verbessert hat. Bei thermisch zeit- und normgemäßen Außenbauteilen hat der Wärmedämmstandard für das Sommerverhalten im Allgemeinen aber nur untergeordnete Bedeutung.
- Eine Aussage über die tatsächliche Speicherfähigkeit einer Konstruktion oder eines Raumes stellt in einem einzelnen Zahlenwert die wirksame Wärmespeicherkapazität oder die daraus ermittelte wirksame Speichermasse dar. Die wirksame Speicherkapazität einer Konstruktion hängt gravierend von der Anordnung ihrer Schichtmaterialien ab. Die wirksame Speicherfähigkeit an

der Innenseite des Bauteils beeinflusst das sommerliche Verhalten eines Raumes, die wirksame Speicherfähigkeit an der Außenseite ist üblicherweise wenig relevant. PlanerInnen können somit durch Materialwahl und Schichtanordnung wesentlich Einfluss auf die wirksame Speicherfähigkeit eines Bauteils oder Raumes nehmen. Die effektive Speicherfähigkeit eines massiven Bauteils wird beispielsweise durch eine Installationsebene, Innendämmung oder abgehängte Decke stark gemindert. Andererseits kann durch entsprechende Materialwahl der innenraumseitigen Schichten (z. B. dicker Lehmputz etc.) die effektive Speicherfähigkeit einer Leichtbau-Konstruktion wesentlich verbessert werden. Die Unterscheidung zwischen Kurz- und Langzeitspeichervermögen gibt bereits Auskunft darüber, dass bei der Wärmespeicherung auch der Faktor Zeit relevant ist. Die Tagesperiode ist für die Berechnung der sommerlichen Überwärmung von Räumen von Interesse, da das periodische Ansetzen eines heißen Sommertages dem Ende einer Hitzeperiode nahekommt (kritischer Fall). Temperaturänderungen breiten sich in einem Material umso schneller aus, je höher dessen Wärmeleitfähigkeit und je geringer die Rohdichte und die spezifische Wärmekapazität sind. Mit geringer Wärmeleitfähigkeit kann in beschränkter Zeit (z. B. der Tagesperiode) demnach auch nur ein kleiner Anteil an Wärme in geringe Tiefe (in Richtung des Wärmestroms) des Bauteils eindringen und somit weniger Masse für die Wärmespeicherung aktiviert werden. In Abschnitt 2.4 werden die Baustoffe Holz, Stahlbeton und Ziegel diesbezüglich analysiert, sowie weitere aufklärende Erkenntnisse zur Wärmespeicherfähigkeit geboten.

- Bezüglich der transparenten Gebäudehüllflächen verringert sich bei Erhöhung der Scheibenzahl der Verglasung sowohl der U-Wert (verbesserte Wärmedämmwirkung), als auch der g-Wert (geringerer Durchlass von Solarstrahlung). Mit Sonnenschutzgläsern können g-Werte stark reduziert und sommerliche Überwärmung verhindert werden. Aus den sommerlichen Strahlungsflüssen (Abb. 2.4) kann man ableiten, dass ost- und westorientierte Fenster während der Sommermonate einen hohen solaren Eintrag aufweisen. Im Osten und Westen, beziehungsweise Südosten und Südwesten muss davon ausgegangen werden, dass aufgrund flacher einfallender Direktstrahlung Verschattungseinrichtungen nur bedingt wirksam sind und mit erhöhter solarer Einstrahlung zu rechnen ist. Eine geeignete energetische Planung sollte der Ausrichtung und dem Außenklima entsprechende Verglasung berücksichtigen und in einem holistischen Ansatz auch ggf. benö-

tigte Wärmegevinne im Winterfall bedenken.

- Die Verschattung (vor allem transparenter Außenbauteile) bewirkt eine sehr wirksame Reduktion der solaren Wärmeeinträge in den Raum. Fixe Beschattung kann durch Dachüberstände, Balkone, (tiefere) Laibung und Stürze, Eigenverschattung durch die Kubatur des Gebäudes selbst (z.B. bei Innenhöfen), durch feststehenden Sonnenschutz, speziell ausgeformte Fassaden (Faltung etc.), durch Vegetation (Bäume), Nachbargebäude im nahen Horizont, Hanglage, oder auch Gebirge im fernen Horizont etc. erfolgen. Die Wirksamkeit von (beweglichen) Sonnenschutzeinrichtungen ist abhängig von deren Lage (außen-, zwischen-, oder innenliegend), der solaren Transmission, Absorption und der Reflexion der Sonnenschutzeinrichtung, sowie vom U-Wert und g-Wert der jeweiligen Verglasung. Außenliegender Sonnenschutz liegt dabei in seiner Wirkung vor zwischenliegendem und dieser wiederum vor innenliegendem Sonnenschutz. Ist nur innenliegender Sonnenschutz möglich, so ist auf hohen Reflexions- und niedrigen Absorptionsgrad zu achten.

Für einen Gesamtüberblick und detaillierte Information bezüglich Einflussfaktoren wird auf Abschnitt 2.5 verwiesen, sowie auf Abschnitt 6.1, wo daraus abgeleitete, allgemein gültige passive Planungshinweise abgegeben werden.

### 8.3 Vergleich von Berechnungsmethoden

Beginnend wird in entsprechendem Abschnitt 3 ein einfaches Handrechenverfahren (vgl. [69]) vorgestellt, das jedoch ausschließlich für eine überschlagsmäßige bzw. schnelle Grobabschätzung des Sommerverhaltens angewendet werden kann und nicht normgemäß ist. Als Ergebnis dieser Methode, die sich der stationären Wärmebilanzgleichung bedient, wird nur der Tagesmittelwert der Lufttemperatur des untersuchten Raumes und kein gesamter Tagesverlauf erhalten, Minima und vor allem interessierende Maxima sind demnach nicht bekannt. Die Verwendung eines solchen grob vereinfachten Verfahrens hat nur die schnelle Grobabschätzung zum Ziel und verliert aufgrund des im Zuge der Arbeit entwickelten Werkzeuges an Bedeutung, wodurch nun schnell realitätsnahe und detaillierte operative Raumtemperaturverläufe erhalten werden.

Die in Österreich für Sommertauglichkeitsnachweise überwiegend eingesetzte Methode ist das vereinfachte Verfahren der ÖNorm B 8110-3, welches bei der Bewertung der Sommertauglichkeit von Wohnräumen gleichberechtigt zu dem zweiten zulässigen Verfahren der Norm, jenem

durch die Berechnung des Tagesverlaufs der operativen Temperaturen, angewendet werden kann. Das „detaillierte“ Verfahren setzt eine thermisch dynamische Gebäudesimulation voraus, wobei das verwendete Simulationsprogramm nach der europäischen Norm EN ISO 13791 validiert sein muss.

In der Fassung 2011 der OIB Richtlinie 6 wurde bei Neubau und größerer Renovierung von Wohngebäuden gefordert, die ÖNorm B 8110-3 [92] mit gegebenen Einschränkungen der Verwendung des vereinfachten Verfahrens einzuhalten. In Anbetracht der Tatsache, dass das vereinfachte Verfahren aufgrund in der Arbeit diskutierter Beschränkungen und simplifizierter Berechnungsansätze keine allgemeingültige Planungssicherheit hinsichtlich der sommerlichen Überwärmung von Räumen bieten kann, gibt es in der aktuellen Fassung der OIB-Richtlinie 6:2015 einen evidenten Rückschritt: Der Nachweis kann nun – abgesehen von den nächtlich offenbaren Fenstern – bedingungslos mit dem vereinfachten Verfahren geführt werden, die Einschränkung der ÖNorm B 8110-3 wird somit ausgehebelt. Problempunkte, die sich durch Verwendung des vereinfachten Verfahrens der Norm ergeben, werden in Abschnitt 3.2.5 anhand Vergleichsrechnungen verdeutlicht und können in folgenden Punkten zusammengefasst werden:

- Unabhängigkeit von der für den Standort geltenden Außenlufttemperatur.
- Vernachlässigung von internen Wärmeeinträgen wie Personen oder Geräten und Beleuchtung.
- Voraussetzung natürlicher Nachtlüftung durch vollständig geöffnete Fenster.
- Nur „Ja“ oder „Nein“ Entscheidung, d. h. keine Information über Raumtemperaturverlauf und vorherrschende Temperaturmaxima.

Um wirklich detaillierte Informationen über das thermisch dynamische Verhalten eines Raumes zu erhalten, müssen demnach instationäre Berechnungs- bzw. Simulationsverfahren zum Einsatz kommen. Erst dadurch werden die zum Teil komplexen Zusammenhänge realitätsnahe, d. h. physikalisch und in ihrem zeitlichen Verlauf korrekt, abgebildet. Der wesentliche Vorteil einer dynamischen Simulationsrechnung gegenüber (stationären) vereinfachten Verfahren ist also, dass eine Prognose für ein geplantes Gebäude zeitabhängig und damit abhängig von Tagesgängen der Umgebungsbedingungen (Außenlufttemperaturen, Sonneneinstrahlung), Lüftungsverhalten und inneren Wärmequellen, unter Berücksichtigung von Raumgeometrie und Baustoffen sowie Verschattungsmaßnahmen abgegeben werden kann.

Die typischen thermisch dynamischen Gebäudesimulationsverfah-

ren, die in diversen Simulationsprogrammen umgesetzt sind (siehe Abschnitt 4.2) werden oft als thermisch dreidimensional rechnend missverstanden, da zur Modellbeschreibung zumeist ein geometrisches 3D-Modell durch den Benutzer erstellt wird. Aus dem geometrischen 3D-Modell kann das Simulationsprogramm diverse Informationen ermitteln, die Wärmeleitung in den Bauteilen wird aber tatsächlich nur in einer Dimension behandelt. In Abschnitt 3.3.3 wird hingegen ein Verfahren vorgestellt, bei dem auch der Einfluss von mehrdimensional ablaufenden Wärmeleitungsprozessen auf die Wärmespeicherung mit hoher Genauigkeit analysiert werden kann. Es ist jedoch anzunehmen, dass die Auswirkung der Wärmebrückeneffekte bei der Berechnung des sommerlichen Wärmeschutzes bei heutigen – thermisch normgemäßen – Konstruktionen vernachlässigbar klein ist.

Die in dieser Arbeit untersuchten Methoden zur Bewertung der Sommertauglichkeit werden in Abschnitt 3 vorgestellt und diskutiert.

## 8.4 Validierung

Die Validierungen vier ausgewählter thermisch dynamischer Simulationsprogramme werden in Abschnitt 5 vorgestellt. Die Prüfung wird anhand der europäischen Norm EN ISO 13791:2012 [93] (siehe Abschnitt 3.1.4) durchgeführt, welche ein Validierungsverfahren zur Berechnung der sommerlichen Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik zur Verfügung stellt. Dabei wird die Berechnung der operativen Temperatur unter periodischen Bedingungen für verschiedene Fälle betrachtet: Zwei unterschiedliche Raumgeometrien A und B mit jeweils 9 Prüffällen, wobei Bauteilaufbauten, Randbedingungen, Lüftungsverhalten und Standort variieren.

Als österreichische Entwicklungen werden ein Prototyp für Bauphysikprogrammsoftware (siehe 4.2.1) als Zeitschrittverfahren und das thermisch dynamische Simulationsprogramm Geba mit dem periodisch eingeschwungenen Berechnungsverfahren detaillierter analysiert und dem Validierungsverfahren unterzogen. Die Validierungsergebnisse der weiteren bekannten Simulationsprogramme Tas und Trnsys werden von den Herstellern zur Verfügung gestellt, jedoch geprüft.

Einer der Prüffälle (A1.b) übersteigt den vorgegeben Wert der Norm bei allen im Zuge der Arbeit durchgeführten Vergleichs-Validierungen. Eine Inkonsistenz der Referenzwerte innerhalb der Norm EN ISO 13791:2012 kann damit als gesichert angenommen werden. Im Trnsys Validierungsbericht [49] wird diesbezüglich genauer ausgeführt:

Die Vergleichsergebnisse des Standards haben sich gegenüber der Vorgängerversion 2005 deutlich verändert. Alle Bezugsergebnisse wur-

den mit Ausnahme des Falles A1.b erhöht. Für Fall A1.b wurde die maximale Betriebstemperatur sogar um 0,5 K verringert. Keine der erwähnten Änderungen in der DIN EN ISO 13791:2012 kann diesen Unterschied verursachen (vgl. [49]).

Im Allgemeinen gestaltet sich die Validierung der Simulationsprogramme nach EN ISO 13791 als schwieriges Unterfangen. Es muss teilweise sehr viel Aufwand betrieben werden, um die Vorgaben der Norm in den einzelnen Simulationsprogrammen abbilden zu können. Zumeist rechnen die Programme unter Berücksichtigung von Einflussfaktoren, die in den Validierungsbeispielen vereinfachend ausgeschaltet werden. Unter den folgenden drei Begriffen lässt sich zusammenfassen, was die Validierung zusätzlich erschwert:

**Unvollständigkeit.** Die Vernachlässigung des langwelligen Strahlungsaustausches ist in den Normvorgaben an keiner Stelle erwähnt. Da dem Thema der langwelligen Strahlung in der EN ISO 13791 in Abschnitt 4.5.4 und in Anhang F breiter Raum gewidmet ist, war die Erkenntnis, dass mit Berücksichtigung dieses Effekts eine Validierung nicht möglich ist, sowohl überraschend als auch ärgerlich.

**Inkonsistenz.** Die Winkelabhängigkeit des Strahlungsdurchgangs durch die Verglasung soll laut Norm vernachlässigt werden. Damit sind Direktstrahlung, Himmelsstrahlung und terrestrische Reflexstrahlung gleichwertig. Dass diese Anteile in der EN ISO 13791 getrennt angegeben sind, ist vollkommen unnötig – und natürlich irreführend.

Auch bezüglich weiterer Angaben herrscht Inkonsistenz und damit Verwirrung vor: Außentemperatur- und Solarstrahlungsdaten sind in der Norm durch Werte zu jeder vollen Stunde des Tages angegeben. Interne Lasten und Luftwechsel hingegen sind in stündlichen Zeitbereichen (0-1 h, 1-2 h, etc.) angegeben. Diese Werte müssen dementsprechend auf Werte zu vollen Stunden approximiert werden, wobei sich die Frage stellt, ob eine lineare Interpolation korrekt ist. Selbig müssen die Ergebnisse der Simulation auch wieder interpoliert werden, da die zu vergleichenden Werte in der Norm inkonsistenter Weise wieder in stündlichen Mittelwerten angegeben sind.

Auch der Prüffall A1.b, als offensichtlich in der Norm falsch angeführtes Ergebnis, stiftet Verwirrung.

**Intransparenz.** An keiner Stelle der Norm wird/werden das/die verwendete(n) Simulationsprogramm(e) zur Erstellung der Validierungsergebnisse erwähnt. Nachforschungen ergaben, dass erste



Ringrechnungen 2002 von der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) als Vorbereitung für die Norm durchgeführt wurden. Eine Nachfrage bei der EMPA brachte ernüchternde Information: Die verantwortliche Abteilung „Bauphysik, Haustechnik und ZEN“ (Zentrum für Energie und Nachhaltigkeit) wurde vor 8 Jahren aufgelöst, an entsprechende Unterlagen kommt man nicht mehr heran, überdies hat die EMPA allgemeine Unterlagen nach 10 Jahren entsorgt. Über das Zustandekommen aktuellerer Normergebnisse (Ausgabe 2010, 2012) konnte keine Information gewonnen werden.

Als Ergebnis der Untersuchungen in Kapitel 5 ergibt sich – abgesehen von dem in der Norm offensichtlich fehlerhaften Teilergebnis A1.b – folgendes Resultat: Trnsys und Tas sind nach der EN ISO 13791 validiert. Geba und das Excel-Tool als Prototyp für Bauphysiksoftware sind nicht nach der EN ISO 13791, aber nach der besten Klasse 1 der EN ISO 13792 (Abweichung max. 1 K) validiert.

Anstatt seitens des Normenausschusses die Validierungsbeispiele zu analysieren, fehlende Eingabedaten zu ergänzen und die Eingabedaten und Ergebnisse der Ringrechnung genauestens zu überprüfen und erforderlichenfalls anzugleichen, scheint es, dass bereits ein anderer Weg eingeschlagen wurde: Die Beispiele werden einfach verworfen und die EN ISO 13791 soll durch die EN ISO 52017-1 ersetzt werden. Ein „Formal Voting“ Exemplar liegt bereits vor. Die Validierung soll sich nach dieser Norm dann nach ASHRAE 140:2014 (BESTEST) orientieren.

## 8.5 Programmentwicklung

Da das in Österreich überwiegend eingesetzte, vereinfachte Normverfahren zu keiner ausreichenden Planungssicherheit führt und somit von realistischeren Ergebnissen und Möglichkeiten thermischer Gebäudesimulationsprogramme weit entfernt ist, wurde im Zuge der Arbeit ein Werkzeug erstellt, welches Abhilfe schafft.

Mit Abschluss dieser Arbeit ist das Ziel erreicht, ein allgemein und kostenlos zugängliches, intuitives Online-Tool mit einer selbsterklärenden, spielerisch zu handhabenden Programmoberfläche zu schaffen, welches im Hintergrund eine detaillierte thermisch dynamische Gebäudesimulation durchführt. Die Anforderungen an das Werkzeug wurden hoch angesetzt:

- Einfache und intuitive Benutzung.
- Erreichbarkeit aller Zielgruppen.
- Keine kommerziellen Programme.

- Betriebssystemunabhängigkeit.
- Unabhängigkeit von anderen Programmen.
- Fehleranfälligkeit minimieren.
- Trennung Benutzeroberfläche und Simulationskern.

Auf dem Weg zur Umsetzung eines Werkzeuges, das den gewünschten Anforderungen gerecht wird, sind unterschiedliche Ansätze verfolgt worden – bis hin zu einer funktionstüchtigen Implementierung als Java Applet. Diese Technologie führte jedoch nicht zum Ziel, da im September 2015 die Ausführung von Java Applets in dem Browser Chrome aus Sicherheitsgründen deaktiviert wurde und auch die längerfristige Ausführbarkeit in anderen Browsern ungewiss war. Aufgrund dieser Entwicklungen konnte das Tool nicht mehr den gesetzten Anforderungen gerecht bleiben und musste in einer zukunftsfähigen Technologie – verbessert durch Erkenntnisse aus den Vorarbeiten und Feedback von Testpersonen – neu implementiert werden. Vor allem bezüglich der Geometrieerzeugung mussten Vereinfachungen für eine endgültige Version durchgeführt werden. Die verschiedenen Ansätze und Vorarbeiten werden in 6.2.2 genauer dokumentiert.

Um der Anforderung eines hohen Grades an Plattformunabhängigkeit gerecht werden zu können, eignen sich Webanwendungen durch die gegebene Client-Server-Architektur besonders gut. Das endgültige Tool namens *Thesim3D* sollte in jedem Fall bei dieser Programmarchitektur bleiben. Zur Umsetzung wurde dann vor allem die Technologie-Triade des Webs, HTML, CSS und JavaScript unter dem Überbegriff HTML5 genutzt. Für die 3D-Modellierung des Raumes wurde WebGL, das Standard-3D-Grafik-API für das Web, eingesetzt. Das Toolkit Three.js wurde verwendet, um auf WebGL aufzubauen und Gebrauch von komfortableren 3D-Grafikfunktionen machen zu können. Der Simulationskern wird serverseitig von einem Java-Webservice gekapselt, welches die Kommunikation mit dem Client ermöglicht. Das Java Webservice übernimmt die Aufgabe der Schnittstelle zu dem Geba-Simulationskern. Der Geba V.10 Simulationskern ist als ein umfangreiches, thermisch dynamisches Gebäude-Simulationsprogramm zu verstehen und besteht intern aus mehreren Programmen, die seriell vom Webservice ausgeführt werden. Geba ist nach dem Validierungsverfahren der EN ISO 13792 nach der besten Klasse 1 validiert.

*Thesim3D* simuliert das thermische Verhalten eines Raumes im periodisch eingeschwungenen Zustand (Periodenlänge: 1 Tag). Es ist daher insbesondere für normgemäße Sommertauglichkeitsuntersuchungen (z. B. gemäß EN ISO 13791 oder ÖNorm B 8110-3) geeignet. Der periodisch eingeschwungene Berechnungsansatz sowie die Beschreibung der Wärmeleitungs- und Wärmespeicherungsmechanismen über

das Bauteil-Matrizenverfahren haben sich als Methoden zur planungsbegleitenden rechnerischen Simulation derart bewährt, dass sie auch in nationale und internationale Normen (ÖNorm B 8110-3 [92], EN ISO 13791 [93], EN ISO 13786 [97]) übernommen wurden [68]. Die Grundlagen zu den genannten Rechenverfahren werden in den Abschnitten 2.7 und 3.3.2 erläutert.

Vor der Freischaltung von *Thesim3D* sollte anhand der Rückmeldungen aus einer Gruppe ausgewählter Testpersonen zum einen herausgefunden werden, ob der intendierte Ansatz einer selbsterklärenden, spielerisch zu handhabenden Programmoberfläche auch in den Augen der Probanden gelungen ist. Zum anderen sollten die Rückmeldungen in eine letzte Überarbeitung von *Thesim3D* vor der Veröffentlichung einfließen. Es wurden dabei 50 ArchitektInnen, BauingenieurInnen und BauphysikerInnen in Österreich, Deutschland und der Schweiz kontaktiert und gebeten, Zeit für das Testen von *Thesim3D* zu erübrigen und anschließend anhand eines Online Fragebogens Rückmeldung zu geben. Die Hauptzielgruppe des Tools, ArchitektInnen, bewerteten die Benutzerfreundlichkeit von *Thesim3D* anhand des System Usability Scale (SUS), einem etablierten und anerkannten Verfahren zur Bewertung der Usability, als „exzellent“.

## Anhang A

### Symbole und Einheiten

Symbol	Größe	Einheit
$a$	Temperaturleitfähigkeit	$m^2/s$
$\alpha$	solarer Absorptionsgrad	-
$A$	Bauteilfläche	$m^2$
$A_F$	Fußbodenfläche eines Raumes	$m^2$
$A_I$	Immissionsfläche	$m^2$
$A_{AL}$	Fensterfläche, gegeben durch die Architekturlichte oder (sonnentechnische) Bauteilfläche	$m^2$
$A_G$	Fläche der transparenten Teile des Fensters (Glasfläche)	$m^2$
$A_R$	Fläche aller nicht transparenten Teile des Fensters (z. B. Rahmen)	$m^2$
$c$	spezifische Wärmekapazität	$J/(kg \cdot K)$
$c_E$	spezifische Wärmekapazität der Einrichtungsgegenstände	$J/(kg \cdot K)$
$c_o$	Referenz-Wärmespeicherkapazität	$J/(kg \cdot K)$
$C$	(wirksame) Wärmekapazität	$J/K$
$C_A$	flächenbezogene wirksame Wärmespeicherkapazität	$J/(K \cdot m^2)$
$C_B$	wirksame Wärmespeicherkapazität des Bauteils	$J/K$
$C_{w,V}$	volumenbezogene wirksame Wärmespeicherkapazität des Raumes	$J/(K \cdot m^3)$
$d$	Dicke einer Schicht	$m$
$\delta$	periodische Eindringtiefe	$m$
$\Delta_t$	Zeitverschiebung; Zeitvorsprung (wenn positiv), Verzögerung (wenn negativ)	$s$ oder $h$

Symbol	Größe	Einheit
$\varepsilon$	Emissionsgrad der langwelligen Strahlung der Oberfläche	-
$f_R$	Rahmenflächenanteil	-
$f_G$	Glasflächenanteil	-
$F_c$	Abminderungsfaktor einer Abschattungseinrichtung	-
$g$	Gesamtenergiedurchlassgrad eines transparenten Bauteils	-
$I$	Intensität der Sonnenstrahlung	$W/m^2$
$I_d$	diffuser Anteil der die Oberfläche erreichenden Sonnenstrahlung	$W/m^2$
$I_D$	direkter Anteil der die Oberfläche erreichenden Sonnenstrahlung	$W/m^2$
$L_{2D}$	zweidimensionaler Leitwert	$W/K$
$L_{3D}$	dreidimensionaler Leitwert	$W/K$
$L_{mn}$	harmonischer thermischer Leitwert	$W/K$
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	$W/(m \cdot K)$
$m_{w,B}$	speicherwirksame Masse eines Bauteils	$kg$
$m_{w,B,A}$	flächenbezogene speicherwirksame Masse eines Bauteils	$kg/m^2$
$m_w$	gesamte speicherwirksame Masse eines Raumes	$kg$
$m_{w,I}$	immissionsflächenbezogene speicherwirksame Masse eines Raumes	$kg/m^2$
$m_{w,I,min}$	mindest erforderliche immissionsflächenbezogene speicherwirksame Masse	$kg/m^2$
$m_{w,V}$	volumenbezogene speicherwirksame Masse eines Raumes	$kg/m^3$
$m_{w,E}$	speicherwirksame Masse der Einrichtung	$kg$
$n_L$	Luftwechselzahl	$1/h$
$\phi$	Phasenverschiebungen	$rad$
$\Phi$	Wärmestrom	$W$
$q$	Wärmestromdichte	$W/m^2$
$Q$	Wärmemenge	$J$
$R$	Wärmedurchlasswiderstand	$m^2 \cdot K/W$
$R_{si}$	innerer Wärmeübergangswiderstand	$m^2 \cdot K/W$
$R_{se}$	äußerer Wärmeübergangswiderstand	$m^2 \cdot K/W$
$\rho$	Dichte	$kg \ m^3$
$\rho$	solarer Reflexionsgrad	-
$\sigma$	Stefan-Boltzmann Konstante	$W/(m^2 \cdot K^4)$
$t$	Zeit	$s$ oder $h$

Symbol	Größe	Einheit
$T$	Periodendauer der Schwankungen	$s$
$\theta$	Temperatur	$^{\circ}C$
$\theta_{op}, t_{op}$	operative Temperatur	$^{\circ}C$
$U$	Wärmedurchgangskoeffizient zwischen Innenraum und Außenumgebung	$W/(m^2 \cdot K)$
$V$	Volumen des Raumes	$m^3$
$V_{L,s}$	immissionsflächenbezogener stündlicher Luftvolumenstrom	$m^3/(h \cdot m^2)$
$X$	flächenbezogene wirksame Wärmespeicherkapazität des Bauteils	$J/(K \cdot m^2)$
$x, y, z$	Koordinaten	$m$
$\xi$	Verhältnis von Schichtdicke zu periodischer Eindringtiefe	—
$Y_{mm}$	Wärmeaufnahme	$W/(m^2 \cdot K)$
$Y_{mn}$	dynamische Wärmeaufnahme	$W/(m^2 \cdot K)$
$Z$	Wärmeübergangsmatrix von Umgebung zu Umgebung	—
$Z_{mn}$	Element der Wärmeübergangsmatrix	—
$Z_{ON}$	Orientierungs- und Neigungsfaktor	1
$\omega$	Kreisfrequenz	$rad/s$

## Anhang B

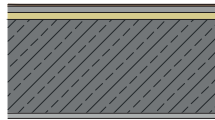
# Aufbauten Simulation

**Tabelle B.1:** Materialkennwerte für Simulation (vgl. [20]). \* Werte gemäß ÖNORM B 8110-7 [96]; \*\* Herstellerwerte; \*\*\* Werte gemäß ÖNORM EN ISO 6946 [98]

Baustoff	$\lambda$ [W/(mK)]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c$ [J/(kgK)]
Beton*	1,65	2200	1000
EPS-F*	0,04	15,8	1450
Gipsfaserplatte*	0,4	1125	1000
Gipsputz*	0,29	800	1000
Glaswolle*	0,04	15	1030
HLB (Velox WSD 50)	0,12	750	1740
Hochlochziegel*	0,114	625	1000
Holz*	0,12	475	1600
Holzfaserdämmplatte (Pavatex Pavatherm)**	0,04	110	2100
Lehmputz (Claytec)**	0,82	1700	1000
Luftraum***	0,9	1,2	1005
MDF*	0,1	400	1700
Normalputz*	0,67	1500	1000
OSB 3 (Egger)**	0,13	600	1700
Stahlbeton*	2,3	2300	1000
Trittschalldämmung*	0,035	80	1030

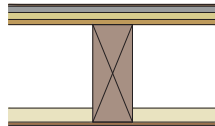
**Deckenaufbauten**

**Massivbaudecke  
Stahlbeton**



- 0,5 cm Holzbohlen
- 1,8 cm Gipsfaserplatte
- 2,0 cm Trittschalldämmung
- 27,0 cm Stahlbeton
- 1,5 cm Normalputz

**Leichtbaudecke  
Holz**



- 0,5 cm Holzbohlen
- 1,8 cm Gipsfaserplatte
- 2,0 cm Trittschalldämmung
- 1,5 cm OSB 3
- 24,0 cm Luftraum (81%)
  - Holz 19%
- 4,0 cm Glaswolle (81%)
  - Holz 19%
- 1,0 cm MDF
- 1,5 cm Normalputz

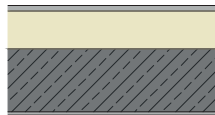
**HLB-Verbunddecke  
Variante ITI**



- 6,0 cm Beton
- 15,0 cm HLB (3 Lagen á 5cm)
- 12,0 cm BSH Fichte

**Wandaufbauten**

**Massivbauwand  
Stahlbeton**



- außen
- 1,5 cm Normalputz
- 11,0 cm EPS-F
- 18,0 cm Stahlbeton
- 1,0 cm Gipsputz
- innen

**Leichtbauwand  
Holz**



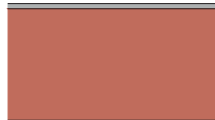
- außen
- 1,5 cm Normalputz
- 1,0 cm MDF
- 12,0 cm Glaswolle 90%,
  - Holz 10%
- 1,5 cm OSB 3
- 1,0 cm Gipsputz
- innen

**HLB-Verbundwand  
Var. ITI**



- außen
- 1,5 cm Normalputz
- 4,0 cm Holzfaserdämmplatte
- 5,0 cm HLB
- 12,0 cm BSH Fichte
- 5,0 cm HLB
- 1,0 cm Lehmputz
- innen

**Massivbauwand  
Ziegel**



- außen
- 1,5 cm Normalputz
- 32,0 cm Hochlochziegel
- 1,0 cm Gipsputz
- innen

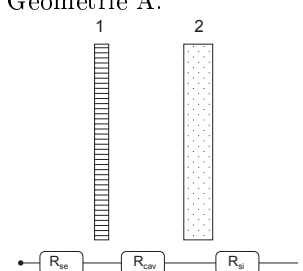
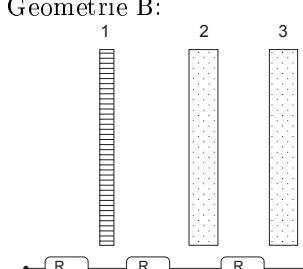
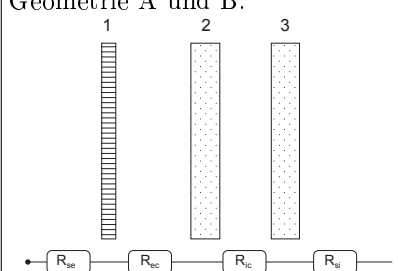
**Abbildung B.1:** Aufbauten für Simulation zur Auswirkung der Wärmespeicherfähigkeit raumbegrenzender Bauteile auf die operative Raumtemperatur im Sommer als auch auf den Heizwärmebedarf im Winter (vgl. [20]).



## Anhang C

# Validierungs-Vorgaben EN ISO 13791, 13792

**Tabelle C.1:** Validierungsvorgaben der EN ISO 13791 und EN ISO 13792.  
Vgl. [93], [94], [32]

Vorgabe	ÖNorm EN ISO 13791:2012	ÖNorm EN ISO 13792:2012									
Innenluft	$c=1008 \text{ J}/(\text{kgK});$ $\rho=1,139 \text{ kg}/\text{m}^3$										
Geometrie	bei beiden gleich: Geometrie A und B siehe Abb. 5.1										
Verglasung	bei beiden gleich: <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Komponente</th> <th><math>\tau_n</math></th> <th><math>\rho_n</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Scheibe</td> <td>0,84</td> <td>0,08</td> </tr> <tr> <td>Sonnenschutz</td> <td>0,2</td> <td>0,50</td> </tr> </tbody> </table>		Komponente	$\tau_n$	$\rho_n$	Scheibe	0,84	0,08	Sonnenschutz	0,2	0,50
	Komponente	$\tau_n$	$\rho_n$								
Scheibe	0,84	0,08									
Sonnenschutz	0,2	0,50									
	Geometrie A:  $R_{se}=0,074 \text{ m}^2\text{K}/\text{W},$ $R_{cav}=0,08 \text{ m}^2\text{K}/\text{W},$ $R_{si}=0,125 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$  Geometrie B:  $R_{se}=0,074 \text{ m}^2\text{K}/\text{W},$ $R_{ec}=0,08 \text{ m}^2\text{K}/\text{W},$ $R_{ic}=0,173 \text{ m}^2\text{K}/\text{W},$ $R_{si}=0,125 \text{ m}^2\text{K}/\text{W},$ $U_g=\text{keine Angabe}$	Geometrie A und B:  $R_{se}=0,074 \text{ m}^2\text{K}/\text{W},$ $R_{ec}=0,08 \text{ m}^2\text{K}/\text{W},$ $R_{ic}=0,173 \text{ m}^2\text{K}/\text{W},$ $R_{si}=0,125 \text{ m}^2\text{K}/\text{W},$ $U_g=\text{keine Angabe}$  Absorption: Sonnenschutz: $\alpha_{sr}=0,309$ Scheibe1: $\alpha_{sr}=0,0183$ Scheibe2: $\alpha_{sr}=0,0145$ Transmission: $\tau_{sr}=0,1525$  Scheibendicke: 6 mm									
Aufbauten	bei beiden gleich:										

Aufbau	d [m]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c$ [kJ/(kgK)]
<b>Typ Nr 1 (Außenwand)</b>				
Außenschicht	0,115	0,99	1 800	0,85
Dämmschicht	0,06	0,04	30	0,85
Mauerwerk	0,175	0,79	1 600	0,85
Innenputz	0,015	0,70	1 400	0,85
<b>Typ Nr 2 (Innenwand)</b>				
Gipsputz	0,012	0,21	900	0,85
Dämmschicht	0,10	0,04	30	0,85
Gipsputz	0,012	0,21	900	0,85
<b>Typ Nr 3 (Decke/Fußboden)</b>				
Kunststoffbelag	0,004	0,23	1 500	1,5
Zementestrich	0,06	1,40	2 000	0,85
Dämmschicht	0,04	0,04	50	0,85
Beton	0,18	2,10	2 400	0,85
<b>Typ Nr 4 (Decke/Fußboden)</b>				
Kunststoffbelag	0,004	0,23	1 500	1,5
Zementestrich	0,06	1,40	2 000	0,85
Dämmschicht	0,04	0,04	50	0,85
Beton	0,18	2,10	2 400	0,85
Dämmschicht	0,10	0,04	50	0,85
Akustikplatte	0,02	0,06	400	0,84
<b>Typ Nr 5 (Dach)</b>				
Außenschicht	0,004	0,23	1 500	1,3
Dämmschicht	0,08	0,04	50	0,85
Beton	0,20	2,1	2 400	0,85
Konvektiver Wärmeübergang	Außen: $h_{c,e}=8,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ Innen: $h_{c,i}=2,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (Wärmestrom horizontal); $h_{c,i}=5,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (Wärmestrom aufwärts); $h_{c,i}=0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (Wärmestrom abwärts);  Vergleichbare Räume: $h_{c,ec}=h_{c,if}$ $h_{c,ef}=h_{c,ic}$		Außen: $h_{c,e}=8,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ Innen: $h_{c,i}=2,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ Keine Angabe über Richtungsabhängigkeit der Wärmeströme.  Vergleichbare Räume: $h_{c,ec}=h_{c,ic}$ $h_{c,ef}=h_{c,if}$	
Langwelliger Strahlungswärmeübergang (innen)	$h_{r,e}=5,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (alle Oberflächen) (Gültig für $\epsilon=0,93$ und $T_{mr}=303 \text{ K}$ )		$h_{r,i}=5,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	

Langwellige Abstrahlung gegen Umgebung (Himmel)	$h_{r,e}=5,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (alle Oberflächen) (Gültig für $\epsilon=0,93$ und $T_{mr}=303 \text{ K}$ )  Die Himmelstemperatur kann nach informativem Anhang F Gleichung (F.2) (gültig für klaren Himmel) zur Bestimmung der Himmelstemperatur angewendet werden. Da jedoch der langwellige Strahlungsaustausch vernachlässigt wird, ist die Himmelstemperatur von keinem Belangen.	$h_{r,e}=5,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ Die Temperatur der Himmelsstrahlung ist gleich der Außenlufttemperatur.
Kurzwellige Strahlung	Solare Verteilungsfaktoren: Boden $f_d=0.5$ Decke $f_d=0.1$ Wände $f_d=0.4$	Keine Angabe zu Verteilungsfaktoren
	Absorptionsgrad (alle Flächen) $\alpha_{sr}=0.6$ Absorptionsgrad Dach $\alpha_{sr}=0.9$ Strahlungszuordnungsfaktor: $f_{sa}=0.1$ Solarer Verlustfaktor: $f_{sl}=0.0$	
Klima	Sonnenstrahlung Angabe aufgeteilt in direkte, diffuse und reflektierte Strahlung	
		Bei Geometrie B ist die Summe gleich der Strahlungsdaten gleich direkt+diffus+reflektiert. Bei Geometrie A ist die Summe ohne der reflektierten Strahlungskomponente.

Stunde	Geometrie A		Geometrie B					
	Horizontal W/m <sup>2</sup>	Vertikal West W/m <sup>2</sup>	Horizontal W/m <sup>2</sup>	Vertikal West W/m <sup>2</sup>				
4	0	0	0	0				
5	4	2	69	22				
6	168	45	225	55				
7	369	78	388	80				
8	557	103	539	101				
9	719	122	669	117				
10	842	137	768	128				
11	920	145	831	135				
12	946	160	852	150				
13	920	381	831	366				
14	842	576	768	558				
15	719	720	669	703				
16	557	787	539	778				
17	369	740	388	756				
18	168	511	225	604				
19	4	20	69	271				
20	0	0	0	0				
Außentemperatur für Geometrie A								
Stunde	$\theta_{ao}$ °C	Stunde	$\theta_{ao}$ °C	Stunde	$\theta_{ao}$ °C	Stunde	$\theta_{ao}$ °C	
1	23,6	7	22,8	13	32,7	19	29,9	
2	23,0	8	23,9	14	33,6	20	28,4	
3	22,5	9	25,8	15	34,0	21	27,0	
4	22,1	10	27,3	16	33,6	22	25,8	
5	22,0	11	29,3	17	32,8	23	24,9	
6	22,2	12	31,2	18	31,5	24	24,2	
Außentemperatur für Geometrie B								
Stunde	$\theta_{ao}$ °C	Stunde	$\theta_{ao}$ °C	Stunde	$\theta_{ao}$ °C	Stunde	$\theta_{ao}$ °C	
1	14,1	7	13,1	13	26,2	19	22,6	
2	13,3	8	14,6	14	27,5	20	20,5	
3	12,6	9	16,6	15	28,0	21	18,7	
4	12,2	10	19,0	16	27,5	22	17,1	
5	12,0	11	21,8	17	26,4	23	15,8	
6	12,3	12	24,3	18	24,6	24	14,9	
Interne Lasten	Stunde	$\phi_i$ W/m <sup>2</sup>	Stunde	$\phi_i$ W/m <sup>2</sup>	Stunde	$\phi_i$ W/m <sup>2</sup>	Stunde	$\phi_i$ W/m <sup>2</sup>
	0 bis 1	0	6 bis 7	0	12 bis 13	10	18 bis 19	15
	1 bis 2	0	7 bis 8	1	13 bis 14	10	19 bis 20	15
	2 bis 3	0	8 bis 9	1	14 bis 15	10	20 bis 21	15
	3 bis 4	0	9 bis 10	1	15 bis 16	1	21 bis 22	15
	4 bis 5	0	10 bis 11	1	16 bis 17	1	22 bis 23	10
	5 bis 6	0	11 bis 12	10	17 bis 18	1	23 bis 24	0

Luftwechsel	a) 00:00-24:00 Uhr: $n=1,0 \text{ h}^{-1}$ b) 00:00-06:00 Uhr: $n=10,0 \text{ h}^{-1}$ ; 06:00-18:00 Uhr: $n=0,5 \text{ h}^{-1}$ ; 18:00-24:00 Uhr: $n=10,0 \text{ h}^{-1}$ c) 00:00-24:00 Uhr: $n=10,0 \text{ h}^{-1}$
Ergebnisse	Die Ergebnisse der operativen Temperaturen weichen v. a. bei Geometrie A weiter voneinander ab (bis 1,2 K), da hier die Reflexstrahlung in der EN ISO 13792 „vergessen“ wurde. Bei Ergebnissen der Prüffälle der Geometrie B ist die Differenz meist unter 0,3 K.

# Anhang D

## Inhalt der CD-ROM

**Format:** CD-ROM, Single Layer, ISO9660-Format

### D.1 PDF-Dateien

**Pfad:** /

Dissertation.pdf . . . . Dissertation (Gesamtdokument)

### D.2 Bilddateien

**Pfad:** /images

\*.ai . . . . . Adobe Illustrator-Dateien  
\*.png . . . . . Portable Network Graphics Bilder  
\*.eps . . . . . Encapsulated PostScript Bilder und  
Diagramme

### D.3 Programm Quellcode

Die Quellcodes des *Thesim3D*-Clients werden aus Gründen ihres Umfangs nicht in dieser Arbeit gedruckt. Der JavaScript Quellcode `nac.min.js` des HTML5 Clients, die Quellcodes der HTML Dateien sowie der Cascading Stylesheets sind entweder im Web unter der Adresse `www.thesim.at`, oder auch dem digitalen Anhang zu entnehmen. Der Quellcode des Java Webservices als Schnittstelle zu dem dynamisch thermischen Gebäudesimulationsprogramm *Geba* wird aus Server-Sicherheitsgründen nicht veröffentlicht. Bei Fragen zum Berechnungskern *Geba* oder dessen Quellcodes in der Programmiersprache

Fortran kann ao. univ. Prof.i.R. Dipl.-Ing. Dr. techn. Klaus Kreč (www.krec.at) oder der Autor dieser Arbeit kontaktiert werden.

**Pfad:** /source

index.html . . . . . HTML Indexdatei  
thesim.html . . . . . HTML5 Hauptdatei

**Pfad:** /source/js

nac.min.js . . . . . JavaScript Hauptdatei mit gesamter Client  
Logik  
webgl.js . . . . . WebGL Grafikbibliothek  
three.min.js . . . . . Three.js Grafikbibliothek  
colladaloader.js . . . . . Collada Loader für Laden von  
3D-Objekten  
jquery-2.2.4.min.js . . . . . Bibliothek für DOM-Navigation und  
-Manipulation  
chosen.jquery.min.js . . . . . Bibliothek für lange Selectboxen  
bootstrap.min.js . . . . . HTML, CSS, und JavaScript Framework  
für „responsive“ Webseiten  
detector.js . . . . . Bibliothek für WebGL Erkennung  
chart.min.js . . . . . Bibliothek für Diagramme  
jquery-ui.min.js . . . . . Bibliothek für Interaktionseffekte  
ga.js . . . . . Google Analytics

**Pfad:** /source/css

nac.min.css . . . . . Cascading Style Sheet Hauptdatei  
bootstrap.min.css . . . . . WebGL Bootstrap CSS  
chosen.min.css . . . . . Chosen CSS  
animate.min.css . . . . . Animations CSS

**Pfad:** /source/img

\*.png . . . . . Portable Network Graphics Bilder  
\*.gif . . . . . Graphics Interchange Format Bilder

**Pfad:** /source/fonts

\*.js . . . . . JavaScript Dateien für 3D-Schrift  
\*.eot . . . . . Schriftdatei



- \*.woff . . . . . Web Open Font Format Schriftdatei
- \*.woff2 . . . . . Web Open Font 2 Format Schriftdatei

**Pfad:** /source/models

- \*.dae . . . . . Collada (Collaborative Design Activity)  
3D-Dateien

**Pfad:** /source/video

- \*.mp4 . . . . . MPEG Video Datei
- \*.ogv . . . . . Ogg Video Datei
- \*.webm . . . . . WebM Video Datei

Die Quellcodes, die im Zuge der Entwicklung bis hin zu dem endgültigen Tool mit anderen Technologien entstanden sind, finden sich in dem folgenden Ordner:

**Pfad:** /source/approaches

- Sketchup . . . . . Ruby Sources
- Revit . . . . . C# .NET Sources
- Java Applet . . . . . Java Sources

## D.4 Sonstiges

**Pfad:** /misc

- \*.\* . . . . . Berichte etc.

Anhang E

Curriculum Vitae

## Ausbildung

- 12 Doktoratsstudium techn. Wissenschaften TU Wien, 5 Jahre [at]
- 09 Masterstudium Architektur TU Wien, 2 Jahre [at]
- 05 Bakkalaureatsstudium Architektur TU Wien, 3,5 Jahre [at]
- 05 Phoenix Language School, Fremantle, 1 Monat [au]
- 00 Diplomstudium Medientechnik und -design FH OÖ, 4 Jahre [at]
- 95 Ingeborg Bachmann Gymnasium, Klagenfurt, 4 Jahre [at]
- 91 BG Mössingerstraße, Klagenfurt, 4 Jahre [at]
- 87 Volksschule 16, Klagenfurt, 4 Jahre [at]

## Berufserfahrung

- 13 TU Wien, Univ.Ass., Institut für Architekturwissenschaften, 4 Jahre [at]
- 11 Architekturbüro Reinberg ZT GmbH, 1 Jahr [at]
- 08 Arco GmbH, Grafik- und Webapplikationsprogrammierung, 1 Monat [at]
- 07 Staunig und Miklautsch Architekturbüro, 1 Monat [at]
- 05 Gründung Einzelunternehmen digitale Datenverarbeitung, 8 Jahre [at]
- 05 [kju:]digitale Medien, Webapplikationsprogrammierung, 2 Jahre [at]
- 05 Perthweb, Webapplikationsprogrammierung, 1 Monat [au]
- 04 Hekotech, Windows Applikationsprogrammierung, 6 Monate [ch]
- 03 Esolut GmbH, Webapplikationsprogrammierung, 6 Monate [de]
- 02 Kelag, Datenverarbeitung, 1,5 Monate [at]
- 01 Bachinger-Hoffmann-Advertising, Web, 1,5 Monate [at]
- 99 Zivildienst bei Caritas, 10 Monate [at]
- 96 bis 99 Ferialpraktika u.a. Pago, Kelag, jeweils 1 Monat [at]

## Lehrtätigkeit

- 17 Hochbau und Tragwerk - Tragwerkslehre (Ba), Grundkurs Architektur und  
 ↑ Konstruktion - Tragwerkslehre (Ba), Orientierungskurs (Ba), Bausysteme  
 | Holzbau (Ba), Holzbau Bauingenieurwesen (Ba), Holzbau 2 Bauingenieur-  
 | wesen (Ma), Modul ressourceneffiziente Materialisierung (Ma) und Modul
- 13 Logik der Struktur (Ma)



joachim nathanael nackler  
 geboren sep80, villach [at]

## Forschungsarbeiten, Veröffentlichungen & Auszeichnungen

- 17 Sommerlicher Wärmeschutz - Vergleich von Berechnungsansätzen und Entwicklung eines Planungsinstrumentes für Entwurfsfindung und Nachweis. Dissertation TU Wien
- 17 Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift (ÖIAZ) Sonderausgabe zum Thema Holzbau: Entwicklung von Holzleichtbeton-Verbundkonstruktionen; Development of Wood Lightweight Concrete Composite (Fadai/Winter/Nackler/Borska)
- 17 Hybrid cross laminated timber plates (wood wisdom-net research project). Hygrothermal building component simulations and thermal room simulations regarding hcltp components (Nackler/Fadai/Winter)
- 15 Whole house in-situ carbon & emission reduction solution - whiscers (Nackler/Saleh Pascha/Fadai/Winter), Berichte aus Energie- und Umweltforschung 28/15 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie
- 15 Individuelle Systemfertighäuser aus Massivholzplatten, Anwendung und Optimierung eines bestehenden Bausystems (Winter/Borska/Szlavik/Abendroth/Nackler/Gasser)
- 15 Summerly overheating of buildings - comparison of different calculation methods and development of an intuitive design tool for planners. Eingeladen zu Phd Colloquium, Vortrag in München [de]
- 15 Entwicklung von Innendämm-Verbundelementen basierend auf Holzfaser - in situ Messung hygrothermischer Performance (Nackler/Wegerer/Fadai/Winter), Ökosan 15, Artikel + Vortrag in Graz [at]
- 15 Numerical simulations of the overall building-physical performance of wood-cement compound-based building skins (Fadai/Nackler), Advanced building skins 2015, Artikel + Vortrag in Bern [ch]
- 15 Measuring the hygrothermal performance of an interior insulation made of woodfibre boards (Wegerer/Nackler/Bednar), Energy Procedia, 78
- 14 Konstruktive und ökologische Aspekte bei der Entwicklung eines Innendämm-Verbundelements für den Altbau (Nackler/Saleh Pascha/Winter), Brenet 2014, Artikel + Poster in Zürich [ch]
- 14 Developing of an internal insulation system made of wood-fibre boards for energy-efficient retrofitting of heritage buildings in Vienna (Nackler/Saleh Pascha/Winter), Artikel + Vortrag in Genf [ch]
- 13 Buchveröffentl.: Wärmeverluste erdberührter Bauteile (Nackler/Kreč) ISBN: 3639470532
- 13 Nominierung und Ausstellung bei Archdiploma (alle 2 Jahre) - beste und interessanteste Abschlussarbeiten der Architektur und Raumplanung der TU Wien (im Bereich Theorie).
- 12 Klimadatenrechner - Oeklim Webservice, Bereitstellung von Klimadaten für Standorte in Österreich im Web im Auftrag des Bundesministeriums für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft (Kreč/Nackler) [www.bmwfw.gv.at/energieundbergbau/klimadatenrechner](http://www.bmwfw.gv.at/energieundbergbau/klimadatenrechner)
- 12 Umsetzung eines periodisch eingeschwungenen Wärmeleitungsmodells in einem 4D-Simulationsprogramm (Kornicki/Nackler/Kreč); Implementation of a periodic thermal conduction model in a 4D simulation program, energodom12, Artikel+Vortrag Krakau [pl]
- 12 Zum Einfluss mehrdimensionaler Wärmeleitung auf das Wärmespeichervermögen von Baukonstruktionen (Kreč/Nackler/Kornicki), BauSim 2012, Artikel+Vortrag in Berlin [de]
- 11 Wärmeverluste erdbodenberührter Bauteile im Passivhausstandard - Vergleich verschiedener Berechnungsverfahren. Diplomarbeit TU Wien, Diplom mit Auszeichnung
- 10 Holzbau Austria 3|2010 Coverthema: Wir sind die Holzbauzukunft, Seite 12+13
- 09 Link it, Schwedter - Nominierung bestes Master Entwerfen TU Wien
- 08 Citybreak, Youth Hostel, Nominierung bestes Bachelor Entwerfen TU Wien
- 04 Multimedia- und Schnittstellenprogrammierung von Windows Mobile für Pocket PC am Beispiel eines GPS gestützten, richtungsbasierten Informationssystemes. Diplomarbeit FH Oberösterreich - Campus Hagenberg

joachim nathanael nackler  
j.nackler@gmail.com, 0664 1056270

# Literaturverzeichnis

- [1] Austria, S.: *Informationsgesellschaft, ikt-einsatz in haushalten und unternehmen*, JUL 2016. [http://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/energie\\_umwelt\\_innovation\\_mobilitaet/informationsgesellschaft/index.html](http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/informationsgesellschaft/index.html).
- [2] Autodesk: *Revit*, JUL 2016. <http://www.autodesk.de/products/revit-family>.
- [3] Böckh, P. und T. Wetzel: *Wärmeübertragung : Grundlagen und Praxis*. Heidelberg, 2015.
- [4] Bednar, T.: *Sommerliches Verhalten von Wohnungen Gebäuden - Zusammenhänge*. Vortrag anlässlich der Veranstaltung Fakten versus Vorurteile d. MHC am 17.11.2010, 2010.
- [5] Bednar, T. und C. Pöhn: *Einfaches Norm-Simulationstool zur Berechnung der operativen Temperaturen in einem Raum*. Techn. Ber., Technische Universität Wien, MA 39 - Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien, 2010.
- [6] Bednar, T., H. Schöberl, R. Hanic und C. Harreither: *Auswirkung verschiedener Baustoffe auf das Sommerverhalten von Gebäuden und den Energieverbrauch*. Endbericht Nachhaltigkeit massiv, AP12 (Programm Energie der Zukunft), 2008.
- [7] Borsch-Laaks, R.: *Sommerlicher Wärmeschutz im Holzbau: Weniger Masse und doch Klasse*. 14. Internationales Holzbau-Forum 08, 2008.
- [8] Brooke, J.: *Sus - a quick and dirty usability scale*. Techn. Ber., Redhatch Consulting Ltd., 2007.
- [9] Brown, T., K. Butters und S. Panda: *Jump Start HTML5*. Site-Point, 2014.
- [10] Cha, Z. und C. Tsuhan: *Efficient feature extraction for 2d/3d objects in mesh representation*. Image Processing, Proceedings International Conference On Image Processing, 2001.

- [11] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN 4108-2:2013, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*, Feb. 2013.
- [12] Doubek, M.: *Vermeidung von sommerlicher Überwärmung - Entwurf eines vereinfachten Rechenmodells*. Techn. Ber., FH Campus Wien, Bauingenieurwesen-Baumanagement, 2008.
- [13] Doyle, M. D.: *Investigation of dynamic and steady state calculation methodologies for determination of building energy performance in the context of the epbd*. Diplomarbeit, Dublin Institute of Technology, Dublin, Ireland, Juli 2008.
- [14] EAA: *Energy consumption for cooling in households*, Jan 2017. <http://www.eea.europa.eu>.
- [15] Ecotech: *Ecotech trend*, Nov 2016. <http://www.ecotech.cc>.
- [16] EDSL: *Edsl tas 9.3.0 compliance with bs en 13791:2012*. Techn. Ber., Environmental Design Solutions Limited, 2014.
- [17] EDSL: *Validation*, Dez 2014. <http://www.edsl.net/main/Software/Validation.aspx>.
- [18] Energy, U.D. of: *EnergyPlus*, Nov 2016. <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus>.
- [19] Energy, U.D. of: *EnergyPlus Documentation, Engineering Reference, The Reference to EnergyPlus Calculations*, 2016.
- [20] Fadai, A. und J. Nackler: *Numerical simulations of the overall building-physical performance of wood-cement compound-based building skins*. Advanced Building Skins, 2015.
- [21] Fahrion, M. S.: *Sommerlicher Wärmeschutz im Zeichen des Klimawandels. Anpassungsplanungen für Bürogebäude*. Dissertation, TU Dresden, Stuttgart, Germany, 2015.
- [22] Fanger, P. O.: *Thermal comfort : analysis and applications in environmental engineering*. Danish Technical Pr., 1970.
- [23] Feist, W.: *Passivhäuser in Mitteleuropa*. Dissertation, TU Kassel, Kassel, Germany, 1993.
- [24] Ferk, H. und D. Rüdiger: *Sommerlicher Wärmeschutz im Klimawandel, Einfluss der Bauweise und weiterer Faktoren*. Zuschnitt Attachment - Sonderthemen im Bereich Holz, Holzwerkstoff und Holzbau, 2016.

- [25] Fischer, H. M., H. Freymuth, P. Häupl, M. Homann, R. Jenisch, E. Richter und M. Stohrer: *Lehrbuch der Bauphysik*. Vieweg+Teubner, 2008.
- [26] Fischer, P. und P. Hofer: *Lexikon der Informatik*. Springer, 2011.
- [27] Flanagan, D.: *JavaScript Das umfassende Referenzwerk*. O'Reilly Media, Inc., 2014.
- [28] Frank, T.: *Sommerlicher Wärmeschutz von Dachräumen, Analyse der Einflussfaktoren auf das Raumklima*. Zeitschrift für Wärmeschutz · Kälteschutz · Schallschutz · Brandschutz, 62:33–45, 2009.
- [29] Frey, S.: *Parameterstudie Kühlenergiebedarf von mehrgeschossigen Wohngebäuden: Wechselwirkungen zwischen Bebauungsstrukturen und Kühlenergiebedarf von Gebäuden*. Diplomarbeit, Fachhochschule Technikum Wien, Masterstudiengang Erneuerbare Urbane Energiesysteme, Wien, Austria, 2014.
- [30] Friembichler, F., T. Bednar, S. Handler, M. Gladt und M. Neusser: *Thermische Bauteilaktivierung. Entwicklung eines Rechenkerns*. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 11/2014 (Programm Haus der Zukunft), 2014.
- [31] Frotscher, T., D. Wang und M. Teufel: *Java Web Services mit Apache Axis2*. PEntwickler.press, 2008.
- [32] Fux, V.: *Thermaplan-Transit, Validierung entsprechend den Anforderungen nach: DIN EN ISO 13791:2012, DIN EN ISO 13792:2012, DIN EN 15255:2007, DIN EN 15265:2007*. Techn. Ber., Thermaplan, 2016.
- [33] Geyer, C., A. Schusser und D. Kehl: *Parameteruntersuchungen des sommerlichen Raumklimas von Wohngebäuden*. Techn. Ber., Eidgenössisches Department für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Energie BFE, 2012.
- [34] GmbH, T. E.: *Trnsys*, Nov 2016. <http://trnsys.de>.
- [35] Goll, J. und C. Heinisch: *Java als erste Programmiersprache, Ein professioneller Einstieg in die Objektorientierung mit Java*. Springer, 7. Aufl., 2014.
- [36] Gueymard, C.: *Smarts (simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine) v.2.9.5*, 2005. <http://www.nrel.gov/rredc/smarts>.

- [37] Gunga, H. C.: *Wärmehaushalt und Temperaturregulation. In: Speckmann, E.; Hescheler, J.; Köhling, R.: Physiologie, Elsevier. Walter de Gruyter, 2004.*
- [38] Haas, H. und W3C: *W3c web services glossary*, JUL 2016. <https://www.w3.org/TR/ws-gloss/>.
- [39] Haferland, F. und W. Heindl: *Ein Verfahren zur Ermittlung des wärmetechnischen Verhaltens ganzer Gebäude unter periodischen Belastungen: ein Beitr. zur Beurteilung des sommerlichen Wärmeschutzes*. Techn. Ber., Untersuchung im Auftrag des Bundesministers für Städtebau und Wohnungswesen, 1971.
- [40] Haferland, F., W. Heindl und H. Fuchs: *Ein Verfahren zur Ermittlung des wärmetechnischen Verhaltens ganzer Gebäude unter periodisch wechselnder Wärmeeinwirkung*. Berichte aus der Bau-forschung, 99, 1975.
- [41] Hammer, R. und P. Holzer: *Qualität und Quantität des Tageslichtangebots in Innenräumen. Potentialstudie unter spezieller Berücksichtigung des strahlungsindizierten thermischen Raumverhaltens und der Photophysiology des Menschen*. Dissertation, TU Wien, Wien, Austria, 2009.
- [42] Hayner, M., J. Ruoff und D. Thiel: *Faustformel Gebäudetechnik: für Architekten*. Dt. Verl.-Anst, 2013.
- [43] Heindl, W.: *Neue Methoden zur Beurteilung des Wärmeschutzes im Hochbau*. Die Ziegelindustrie, 4,5,6, 1967.
- [44] Heindl, W. und H. Koch: *Die Berechnung von Sonneneinstrahlungsintensitäten für wärmetechnische Untersuchungen im Bauwesen*. Gesundheits-Ingenieur, 97, H.12, 1976.
- [45] Heindl, W. und K. Kreč: *Interpolation und Kontinuierisierung*. Techn. Ber., Forschungsbericht im Auftrag des BMWF., 1985.
- [46] Heindl, W., K. Kreč, E. Panzhauser und A. Sigmund: *Wärmebrücken*. Springer-Verlag Wien-New York, 1987.
- [47] Hellwig, R.: *Komfortschutz und Nutzerakzeptanz - Thermohygri-scher, visueller und akustischer Komfort sowie Einflussnahme des Nutzers als Kriterien zur Nachhaltigkeitsbewertung von Bürogebäuden*. IBO, 2009.
- [48] Herzog, T., R. Krippner und W. Lang: *Fassaden Atlas*. Walter de Gruyter, 2004.



- [49] Hiller, M., J. Lam und J. Preuss: *Validation of trnsys 17.1 according to din en iso 13791:2012-08*. Techn. Ber., TRANSSOLAR Energietechnik GmbH, 2014.
- [50] Hiller, M. A. und M. Schulz: *Das dynamische Gebäude- und Anlagensimulationsprogramm TRNSYS*. Bauphysik Kalender 2015, 2015.
- [51] Ho, D.: *Notepad++*, JUL 2016. <https://notepad-plus-plus.org>.
- [52] Häupl, P.: *Bauphysik - Klima Wärme Feuchte Schall: Grundlagen, Anwendungen, Beispiele*. Ernst, 2008.
- [53] Ipser, C., G. Radinger, M. Winkler, H. Floegl und S. Geissler: *Reduktion des Kühlenergiebedarfs durch optimierte Bauwerksstrukturen und Prozess und Entwurfsoptimierung in der Gebäudeplanung, Berichte aus Energie- und Umweltforschung*. Techn. Ber., Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2015.
- [54] Jayasinghe, D. und A. Azeez: *Apache Axis2 1.5 Web Services*. Packt Publishing, 2011.
- [55] Kehl, D.: *Sommerliches Komfortklima Plan- und nachweisbar?! Holzbautag Biel 2010*, 2010.
- [56] Keller, B. und S. Rutz: *Pinpoint - Fakten der Bauphysik zu Nachhaltigem Bauen*. ETH Zürich, vdf Hochschulverlag, 2011.
- [57] Koch, H. A. und U. Pechinger: *Möglichkeiten zur Berücksichtigung von Sonnen- und Wärmestrahlungseinflüssen auf Gebäudeoberflächen*. Gesundheits-Ingenieur, Heft 10, Band 98, 1977.
- [58] Koch, S.: *JavaScript. Einführung, Programmierung und Referenz*. Heidelberg: dpunkt-Verl., 2011.
- [59] Koppe, C.: *Gesundheitsrelevante Bewertung von thermischer Belastung unter Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung der Bevölkerung an die lokalen Witterungsverhältnisse*. Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany, 2005.
- [60] Kornicki: *AnTherm*, Dez 2016. <http://www.antherm.at>.
- [61] Kornicki, Thomas: *SolRad3*, März 2002. <http://www.antherm.at/download/files/SolRad/SolRad3.pdf>.
- [62] Kreč, K.: *Wärmeleitung in Baukonstruktionen unter Berücksichtigung von Wärmequellen*. Gesundheits-Ingenieur, 6:313–318, 1993.

- [63] Kreč, K.: *Zur Wärmespeicherung in Baukonstruktionen*. Gesundheits-Ingenieur, 1:11–18, 1993.
- [64] Kreč, K.: *Zur dreidimensionalen Simulation des thermischen Verhaltens von Gebäuden*. Gesundheits-Ingenieur, 2000.
- [65] Kreč, K.: *Bewertung der Sommertauglichkeit von Gebäuden*. Techn. Ber., Büro für Bauphysik, Schönberg am Kamp, AT, März 2006.
- [66] Kreč, K.: *Berechnung der spezifischen Wärmekapazität der Ersatzkonstruktion*. Techn. Ber., Büro für Bauphysik, 2007.
- [67] Kreč, K.: *Wärmeleitung und Wärmespeicherung in plattenförmigen Bauteilen*. Techn. Ber., Büro für Bauphysik, Schönberg am Kamp, AT, Nov. 2007.
- [68] Kreč, K.: *Geba Handbuch, Simulation des thermischen Verhaltens von Räumen, Raumgruppen oder Gebäuden*, 2008.
- [69] Kreč, K.: *Thermische Gebäudesimulation*. VU, Präsentation, 2014.
- [70] Kreč, K.: *Schnittstelle: Eingabeoberfläche - GEBA V8.0*. Techn. Ber., Büro für Bauphysik, Schönberg am Kamp, AT, Juli 2016.
- [71] Kreč, K. und J. Nackler: *OEKLIM - Klimadaten für das Bauwesen, Klimadatenrechner im Auftrag des BMWFJ*, 2012. <http://www.bmwfw.gv.at/klimadatenrechner>.
- [72] Kreč, K., J. Nackler und T. Kornicki: *Zum Einfluss mehrdimensionaler Wärmeleitung auf das Wärmespeichervermögen von Baukonstruktionen*. Fourth German-Austrian IBPSA Conference, IBPSA, Berlin University of the Arts, 2016.
- [73] Langner, N. und M. Illner: *Thermische Behaglichkeit nach DIN EN ISO 7730 - Ein Ansatz zur vereinfachten Datenaufnahme und Berechnung für die Bewertung von Bürogebäuden*. Bauphysik, 37, 2015.
- [74] Lautenschlager, M., C. Keuler, K. and Wunram, E. Keup-Thiel, M. Schubert, A. Will, B. Rockel und B. U.: *Climate simulation with clm, climate of the 20th century run no.3, data stream 3: European region mpi-m/mad*. Techn. Ber., World Data Center for Climate, 2005.
- [75] Lautenschlager, M., C. Keuler, K. and Wunram, E. Keup-Thiel, M. Schubert, A. Will, B. Rockel und B. U.: *Climate simulation with clm, scenario a1b run no.2, data stream 3: European region mpi-m/mad*. Techn. Ber., World Data Center for Climate, 2009.

- [76] Leimer, H.P.: *Bauphysik / Building Physics*. Carl Hanser Verlag GmbH und Co. KG, 2016.
- [77] Limited, E.D.S.: *A-Tas Theory Manual and Building Simulator Documentation*, 2016.
- [78] Müller, D., E. Michael und M. Spadarotto: *Nachweisverfahren sommerlicher Wärmeschutz von Holzbauten in der SIA 180*. Techn. Ber., Pirmin Jung, Büro für Bauphysik, 2015.
- [79] Müller, R.: *Thermodynamik, Ein Lehrbuch für Ingenieure*. De Gruyter, 2014.
- [80] Murdock, K.: *Google SketchUp and SketchUp Pro 7 Bible*. Wiley Publishing Inc, 2009.
- [81] Nackler, J.: *Wärmeverluste erdbodenberührter Bauteile im Passivhausstandard : Vergleich verschiedener Berechnungsverfahren*. Diplomarbeit, TU Wien, Architektur, Wien, Austria, Dez. 2010.
- [82] OIB: *OIB-Richtlinie 6, NAT-T13 Excel, EXCEL-Tool zur Berechnung der Außentemperatur mit einer durchschnittlichen Überschreitungshäufigkeit von 13 Tagen*, OCT 2009. <https://www.oib.or.at/de/guidelines/oib-richtlinie-6-nat-t13-excel>.
- [83] OIB, Österreichisches Institut für Bautechnik: *OIB-Richtlinie 6, Energieeinsparung und Wärmeschutz*, März 2015.
- [84] ON Österreichisches Normungsinstitut: *ÖNORM EN 7726:2001, Umgebungsklima - Instrumente zur Messung physikalischer Größen*, Okt. 2001.
- [85] ON Österreichisches Normungsinstitut: *ON V 31:2001, Katalog für wärmeschutztechnische Rechenwerte von Baustoffen und Bauteilen*, Dez. 2001.
- [86] ON Österreichisches Normungsinstitut: *ÖNORM EN ISO 7730:2006, Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit*, Juni 2006.
- [87] ON Österreichisches Normungsinstitut: *ÖNORM B 8110-6:2007, Wärmeschutz im Hochbau, Grundlagen und Nachweisverfahren - Heizwärmebedarf und Kühlbedarf*, Aug. 2007.
- [88] ON Österreichisches Normungsinstitut: *ÖNORM EN 15251:2007, Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik*, Sep. 2007.

- [89] ON Österreichisches Normungsinstitut: *ÖNORM B 8110-5 Bbl2:2010, Wärmeschutz im Hochbau - Teil 5: Klimamodell und Nutzungsprofile - Beiblatt 2: Außenlufttemperatur mit einer Überschreitungshäufigkeit von 130 Tagen in 10 Jahren*, März 2010.
- [90] ON Österreichisches Normungsinstitut: *ÖNORM EN ISO 9241-210:2010, Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme*, Dez. 2010.
- [91] ON Österreichisches Normungsinstitut: *ÖNORM EN 410:2011, Glas im Bauwesen - Bestimmung der lichtechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen*, Apr. 2011.
- [92] ON Österreichisches Normungsinstitut: *ÖNORM B 8110-3:2012, Wärmeschutz im Hochbau, Vermeidung sommerlicher Überwärmung*, März 2012.
- [93] ON Österreichisches Normungsinstitut: *ÖNORM EN ISO 13791:2012, Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik - Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren*, Juni 2012.
- [94] ON Österreichisches Normungsinstitut: *ÖNORM EN ISO 13792:2012, Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Berechnung von sommerlichen Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik - Vereinfachtes Berechnungsverfahren*, Juni 2012.
- [95] ON Österreichisches Normungsinstitut: *ÖNORM H6040:2001, Berechnung der sensiblen und latenten Kühllast sowie der sommerlichen Temperaturgänge von Räumen und Gebäuden*, Nov. 2012.
- [96] ON Österreichisches Normungsinstitut: *ÖNORM B 8110-7 2013, Wärmeschutz im Hochbau - Teil 7: Tabellierte wärmeschutztechnische Bemessungswerte*, März 2013.
- [97] ON Österreichisches Normungsinstitut: *ÖNORM EN ISO 13786:2015, Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen - Dynamisch-thermische Kenngrößen - Berechnungsverfahren*, 2015.
- [98] ON Österreichisches Normungsinstitut: *ÖNORM EN ISO 6946:2015, Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren*, Juni 2015.
- [99] Parisi, T.: *Programming 3D Applications with HTML5 and WebGL*. O'Reilly Media, Inc., 2014.

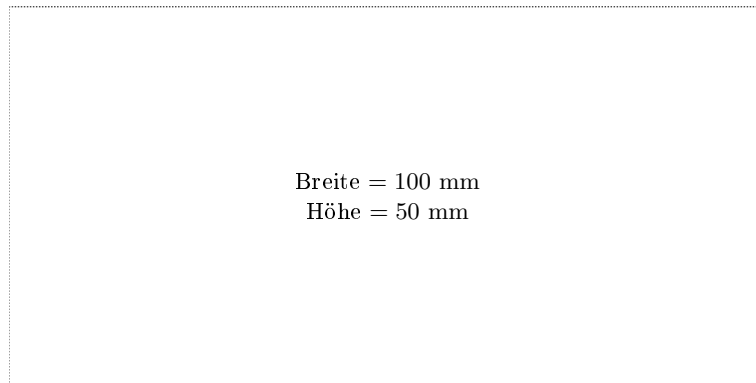
- [100] Pöhn, C., A. Pech, T. Bednar und W. Streicher: *Bauphysik - Erweiterung 1: Energieeinsparung und Wärmeschutz Energieausweis - Gesamtenergieeffizienz*. Springer, 2012.
- [101] Pokorny, M.: *Validierung und Vergleich von Methoden zur Berechnung der Kühllast von Räumen und Gebäuden*. Diplomarbeit, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften, Technische Universität Wien, Wien, Juni 2009.
- [102] Puybaret, E.: *Sweethome3d*, JUL 2016. <http://www.sweethome3d.com>.
- [103] Ragonesi, M., A. Paulus, I. Plüss, G. Notter, M. Ettl, D. Burkhardt, R. Miloni, S. Lenel, O. Bachmann, E. Schüller, U. Wolfisberg und B. Zurfluh: *Bautechnik der Gebäudehülle: Bau und Energie*. vdf Hochschulverlag AG, 2016.
- [104] Rauer, M.: *Quantitative Usability-Analysen mit der System Usability Scale (SUS)*, Dez 2011. <https://blog.seibert-media.net/blog/2011/04/11/usability-analysen-system-usability-scale-sus>.
- [105] Rauschmayer, A.: *Speaking JavaScript*. O'Reilly Media, Inc., 2014.
- [106] Reich, G. und M. Reppich: *Regenerative Energietechnik : Überblick über ausgewählte Technologien zur nachhaltigen Energieversorgung*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [107] Riccabona, C. und T. Bednar: *Baukonstruktionslehre 4: Bauphysik*. Manz, 2013.
- [108] Richter, M. und M. Flückiger: *Usability Engineering kompakt: Benutzbare Software gezielt entwickeln*. Spektrum Akademischer Verlag, 2010.
- [109] Rohregger, G. e. a.: *Behagliche Nachhaltigkeit, Untersuchungen zum Behaglichkeits- und Gesundheitswert von Passivhäusern. Berichte aus Energie- und Umweltforschung*. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2004.
- [110] Roseberger, R., T. Bednar, H. Schöberl, H. Ponweiser, C. Pöhn, A. Storch, W. Wagner und J. Schnieders: *Entwicklung des ersten rechtssicheren Nachweisverfahrens für Plusenergiegebäude durch komplette Überarbeitung der ÖNORMEN*. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 06/2013 (Programm Haus der Zukunft), 2013.

- [111] Rouvel, L.: *Test- und Validierungsbeispiele der DIN EN ISO 13791 und DIN EN ISO 13792 zum instationären thermischen Verhalten von Räumen und Gebäuden*. Techn. Ber., GEBSIMU, 2014.
- [112] Schittich, C., G. Staib, D. Balkow, M. Schuler und W. Sobek: *Glasbauatlas*. Birkhäuser, 2012.
- [113] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein: *SIA 180:2014, Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden*, Juli 2014.
- [114] Sibold, C. und H. Huber: *Vollzug sommerlicher Wärmeschutz - Bericht zuhanden der Konferenz Kantonalen Energiefachstellen (EnFK)*. Techn. Ber., Institut Energie am Bau, FHNW Muttenz, 2016.
- [115] Solar Energy Laboratory, U.o.W.M.: *Volume 5, Multizone Building modeling with Type56 and TRNBuild*, 2012.
- [116] Sonnleithner, M.: *Sommerliche Überwärmung - Maßnahmen und Sonnenschutz*. Techn. Ber., Energie Beratung Niederösterreich, 2014.
- [117] Teibinger, M., F. Ehrlich, S. Nagl und H. Pichler: *Energy efficiency, Sommerbehaglichkeit in Holzgebäuden*. Techn. Ber., Holzfor- schung Austria, 2014.
- [118] Thermal Energy System Specialists, T.: *Trnsys*, Nov 2016. <http://www.tess-inc.com/trnsys>.
- [119] Trimble: *Sketchup*, JUL 2016. <http://www.sketchup.com>.
- [120] VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG): *VDI-Richtlinie 6020, Anforderungen an thermisch-energetische Re- chenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation*, Sep. 2016.
- [121] W3C: *W3c web browser statistics and trends*, JUL 2016. [http://www.w3schools.com/browsers/browsers\\_stats.asp](http://www.w3schools.com/browsers/browsers_stats.asp).
- [122] Weigand, B. und J. Köhler: *Thermodynamik kompakt*. Springer, 2013.
- [123] Windisch, H.: *Thermodynamik: Vom Tautropfen zum Solarkraft- werk*. De Gruyter, 2014.
- [124] ZAMG: *Klima / Informationsportal Klimawandel / Klima- forschung / Klimamodellierung / Emissionsszenarien*, Dez 2016. <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/standpunkt/klimaforschung/klimamodellierung/emissionsszenarien>.

- [125] ZAMG: *Klima / Informationsportal Klimawandel / Klimazukunft / Alpenraum / Lufttemperatur*, Dez 2016. <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimazukunft/alpenraum/lufttemperatur>.
- [126] ZAMG: *Klima / Informationsportal Klimawandel / Standpunkt / FAQ*, Dez 2016. <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/standpunkt/faq>.

# Messbox zur Druckkontrolle

— Druckgröße kontrollieren! —



— Diese Seite nach dem Druck entfernen! —