

Kirsten Höttges, Michael Krause
Juan Rodriguez Santiago, Matthias Kersken
Thomas Haussmann, Stephan Schlitzberger

Erarbeitung von Bewertungsverfahren zur Berücksichtigung der Eigenschaften von PCM-Produkten im Rahmen der DIN V 18599 und DIN 4108 Teil 2

F 3116

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2019

ISBN 978-3-7388-0285-6

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung

Erarbeitung von Bewertungsverfahren zur Berücksichtigung der Eigenschaften von PCM-Produkten im Rahmen der DIN V 18599 und DIN 4108 Teil 2

Abschlussbericht

Erarbeitung von Bewertungsverfahren zur Berücksichtigung der Eigenschaften von PCM-Produkten im Rahmen der DIN V 18599 und DIN 4108 Teil 2

Abschlussbericht

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-15.38)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

Dipl.-Ing. Kirsten Höttges, IEE

Dr.-Ing. Michael Krause, IEE

Dr. Juan Rodriguez Santiago, IEE

Dipl.-Ing. Matthias Kersken, IBP

Dipl.-Ing. Thomas Haussmann, ISE

Dr.-Ing. Stephan Schlitzberger, IBH

Projektpartner:

Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE, Kassel

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Holzkirchen

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg

Ingenieurbüro Hauser IBH, Kassel

BASF SE, Ludwigshafen

Rubitherm Technologies GmbH, Berlin

Gütegemeinschaft PCM e.V., Stuttgart

Knauf Gips KG, Iphofen

Kassel, 25.07.2018

Inhalt

1	Zusammenfassung	8
2	Projektbeschreibung	9
2.1	Projektbeteiligte	9
2.2	Anlass / Ausgangslage	10
2.3	Gegenstand des Forschungsvorhabens	10
3	Untersuchungsmethodik	11
4	Einführung in die Berechnungsverfahren	14
4.1	Energetische Bewertung gemäß DIN V 18599 (Monatsbilanzverfahren)	14
4.1.1	Energieeinsparverordnung und Normung	14
4.1.2	Kurzbeschreibung der Inhalte der Norm	14
4.1.3	Berechnungsansatz Nutzwärme und Nutzkälte	15
4.2	Mindestanforderung an den sommerlichen Wärmeschutz gemäß DIN 4108-2	17
4.2.1	Anwendungsbereich	17
4.2.2	Vereinfachtes Verfahren, Sonneneintragskennwerte	18
4.2.3	Nachweis mittels thermischer Gebäudesimulation	20
4.3	Thermische Gebäudesimulation	21
5	Mögliche Schnittstellen zu den Verfahren der Norm	21
6	Variantenbildung	24
6.1	Gebäude (Nutzung, Geometrie, Bauteile)	24
6.2	Gebäudemodell (Einraummodul)	26
6.3	Gebäudetechnik	26
6.4	Kühldecke und PCM	27
7	Funktionsbeschreibung PCM-Systeme	28
7.1	Passive PCM-Flächenkühlsysteme	28
7.2	Aktive PCM-Flächenkühlsysteme	30
7.3	Dezentrale PCM-Lüftungssysteme	33
7.4	Einschätzung hinsichtlich der positiven Eigenschaften der drei betrachteten PCM-Systeme	35
8	Simulationsmodelle	37
8.1	PCM - Baustoffe (esp-r)	37

8.1.1	Fallunterscheidung	37
8.2	PCM - Kühldecke (TRNSYS)	38
8.2.1	Grundidee Fallunterscheidung	38
8.2.2	Basismodell, Variantenbildung und globale Variablen	39
8.2.3	Systemregelung	41
8.3	Lüftungsanlage	42
8.3.1	Untersuchtes Lüftungssystem	42
8.3.2	Auswahl des PCMs	47
9	Ergebnisse	51
9.1	Variantenbezeichnungen in Tabellen und Diagrammen	51
9.2	Auswertung der Simulationsrechnungen - Methode	54
9.2.1	Sommerlicher Wärmeschutz DIN 4108-2	54
9.2.2	Nutzenergie DIN V 18599	57
9.3	Bauplatte - sommerlicher Wärmeschutz DIN 4108-2	60
9.3.1	Einfluss Gebäudeschwere - mittlerer Parametersatz	61
9.3.2	Einfluss Orientierung und Klimaregion	64
9.3.3	Einfluss Nachtlüftung	69
9.3.4	Gegenüberstellung Simulation und Sonneneintragskennwerte	73
9.3.5	Erfahrungen mit dem Einsatz von Simulationsrechnungen für die Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes	76
9.3.6	Fazit zur Nutzbarkeit der Ergebnisse der Simulationsrechnungen für die Entwicklung neuer Berechnungsansätze	77
9.4	Bauplatte - Nutzenergie Kühlen DIN V 18599	78
9.4.1	Vorbemerkung zur Behandlung der Lüftung in DIN V 18599	78
9.4.2	Vergleichbarkeit Simulation und normative Berechnung - ohne PCM	78
9.4.3	Vergleich mit/ohne PCM (Simulation) - Einfluss Gebäudeschwere - mittlerer Parametersatz	80
9.4.4	Vergleich mit/ohne PCM (Simulation) - Einfluss Orientierung	82
9.4.5	Vergleich Simulation und normative Berechnung - mit PCM - neuer Ansatz für DIN V 18599	83
9.5	Lüftungsanlage - sommerlicher Wärmeschutz DIN 4108-2	89
9.5.1	Einfluss Gebäudeschwere - mittlerer Parametersatz	89
9.5.2	Fazit zur Nutzbarkeit der Ergebnisse der Simulationsrechnungen für die Entwicklung neuer Berechnungsansätze	92
9.6	Lüftungsanlage - Nutzenergie Kühlen DIN V 18599	93
9.6.1	Vergleichbarkeit Simulation und normative Berechnung - ohne PCM	93

9.6.2	Berechnung Nutzkältebedarf gem. DIN V 18599 bei Einsatz mechanischer Lüftung	94
9.6.3	Fazit für die Behandlung der Lüftung im Berechnungsansatz des Nutzkältebedarfs gem. DIN V 18599	96
9.7	Kühldecke - Nutzenergie Kühlen DIN V 18599	97
9.7.1	Simulationsmodell Kühldecke: Modellierung und Steuerung/Betriebsweise	97
9.8	Kühldecke - Sommerlicher Wärmeschutz DIN 4108-2	103
1 0	Fazit und Ausblick	105
1 1	Literaturverzeichnis	110
1 2	Anhang: Randbedingungen DIN 4108-2	113
12.1	Randbedingungen vereinfachtes Verfahren (Sonneneintragskennwerte)	113
12.1.1	Nettogrundfläche und Raumtiefe	113
12.1.2	Fensterrahmenanteil und Fensterfläche	113
12.1.3	g-Wert, Sonnenschutz und bauliche Verschattung	113
12.1.4	Bauart (wirksame Wärmespeicherfähigkeit)	114
12.2	Berechnungsrandbedingungen für thermische Gebäudesimulationsrechnungen	114
a)	Simulationsumgebung	114
b)	Nutzungen/Nutzungszeiten	114
c)	Klimadaten für die Berechnungen	114
d)	Beginn der Simulationsrechnungen und Zeitraum für die Auswertung	115
e)	Interne Wärmeeinträge	115
f)	Soll-Raumtemperatur für Heizzwecke (ohne Nachtabsenkung)	115
g)	Grundluftwechsel	115
h)	Erhöhter Tagluftwechsel	116
i)	Nachtluftwechsel	116
j)	Steuerung Sonnenschutz	117
k)	Wärmeübergangswiderstände	117
l)	Bauliche Verschattung	118
m)	Passive Kühlung	118
12.3	Ausgabe/Ergebnis Simulation	118
1 3	Anhang: Randbedingungen DIN V 18599	119
13.1	Wärmebrücken - DIN V 18599-2	119
13.2	Luftwechsel - DIN V 18599-2	119

13.3	Saisonaler Fensterluftwechsel bei Wohnnutzung - DIN V 18599-2	120
13.4	Steuerung Sonnenschutz - DIN V 18599-2	120
13.5	Bauart (wirksame Wärmespeicherfähigkeit) - DIN V 18599-2	121
13.6	Nutzungsprofile - DIN V 18599-10	123
13.7	Klimadaten - DIN V 18599-10	124
1 4	Anhang: Nutzungsrandbedingungen DIN V 18599-10 Ausgabe 2016-10.	125
1 5	Anhang: Weitere Quellen für Randbedingungen	129
15.1	DIN 4108-4 : 2013-02	129
15.2	DIN EN 12831 : 2003-08	129
15.3	DIN EN 13779 : 2007-09 (DIN SPEC 2009-12 Nationaler Anhang)	129
15.4	DIN EN 15251 : 2012-12	130
15.5	DIN EN ISO 10456 : 2010-05	130
15.6	DIN EN ISO 13370 : 2008-04 (Entwurf 2015-06)	130
15.7	DIN EN ISO 13789 : 2008-04 (Entwurf 2015-06)	131
15.8	DIN EN ISO 13791 : 2012-08	132
15.9	DIN EN ISO 13792 : 2012-08	133
15.10	DIN EN ISO 13786 : 2008-04 (Entwurf 2015-06)	133
15.11	DIN EN ISO 6946 : 2008-04 (Entwurf 2015-06)	134
15.12	VDI 2078 : 2015-06	134
15.13	VDI 6007-1 : 2007-10	135
15.14	VDI 6007-2 : 2012-03	135
15.15	VDI 6007-3 : 2015-06	135
15.16	VDI 6020-1 : 2001-05	136
15.17	Regeln zur Datenaufnahme	136
1 6	Anhang: Umsetzung Randbedingungen für die Berechnungen/Simulationen	137
16.1	Geometrie	137
16.1.1	Berechnungsmodell Einraummodul	137
16.1.2	Geometrische Randbedingungen	138
16.2	Bauteile (Kennwerte, Gebäudeschwere)	139
16.2.1	Kenndaten opake und transparente Bauteile	139
16.2.2	Wärmeübergang (U-Wert-Berechnung)	140
16.2.3	Gebäudeschwere, wirksame Wärmespeicherfähigkeit	141
16.2.4	Bauteilaufbauten	142
16.2.5	Anpassung der Bauteilaufbauten bezüglich U-Wert und Zeitkonstante	146
16.2.6	Sonnenschutz	149
16.3	Nutzungsbedingte Randbedingungen	150

16.4	Raumtemperaturen - DIN V 18599-2	152
16.4.1	Raumtemperatur in der bilanzierten Zone - Heizfall	152
16.4.2	Raumtemperatur in der bilanzierten Zone - Kühlfall	152
16.5	Klimadaten	155
16.6	Luftwechsel	155
16.7	Zeitabhängige Parameter	157
16.8	Randbedingungen operative Temperatur/thermischer Komfort	159
1 7	Anhang: Validierung der Simulationsmodelle mittels Messdaten	160
17.1	Validierung Bauplatte	160
17.1.1	Messaufbau	160
17.1.2	Simulationsmodell	162
17.1.3	Validierung	163
17.2	Validierung Kühldecke	165
17.2.1	Messaufbau	165
17.2.2	Simulationsmodell	167
17.2.3	Statische Simulation	169
17.2.4	Dynamische Simulation	170
17.3	Validierung Lüftung	171
17.3.1	Datengrundlage der Validierung	171
17.3.2	Simulationsmodell	173

1 Zusammenfassung

Für den Einsatz von Phasenwechselmaterialien (Phase Change Materials, PCM) werden heute in der Baupraxis bereits verschiedene Systeme umgesetzt. Die Einsatzbereiche umfassen dabei passive Systeme (Bauplatten) sowie aktive bzw. hybride Systeme (Kühldecken und -wände, Lüftungsanlagen und Speicher).

Eine **rechnerische Bewertung** der energetischen Effekte von PCM sowie die Auswirkungen auf den thermischen Komfort kann mittels thermischen Simulationsrechnungen auf Stundenbasis erfolgen. Im Rahmen der rechtlich erforderlichen Nachweisverfahren

- Energieeinsparverordnung EnEV [1] bzw. zukünftiges Gebäudeenergiegesetz GEG (DIN V 18599 [2]) sowie
- Mindestanforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz (DIN 4108-2 [3])

finden thermische Simulationsrechnungen nur in Ausnahmefällen (EnEV) bzw. nicht als Regelverfahren (DIN 4108-2) Anwendung. Wünschenswert wäre die Möglichkeit, den Einsatz von PCM in die **normativen Berechnungsverfahren** zu implementieren, um so eine energetische Bewertung dieser Systeme auch im Rahmen der Nachweisführung - d.h. für eine weiter verbreitete Anwendung - zu ermöglichen.

Dabei geht es vor allem darum, geeignete **Schnittstellen und Algorithmen** (Ansätze) zu identifizieren und zu verifizieren. Der Prozess der Verifikation erfolgt mittels der Gegenüberstellung von Berechnungsergebnissen aus thermischen Gebäudesimulationen und normativen Berechnungen auf Grundlage einheitlicher und abgestimmter Modelle und Randbedingungen. Nicht in allen Fällen können deckungsgleiche Randbedingungen in Ansatz gebracht werden, bedingt durch die Unterschiede zwischen Simulation und normativer Berechnung, z.B. bei Vorlage von Stundenwerten einerseits und Tages- bzw. Monatsmittelwerten andererseits.

Aus der im Projekt erarbeiteten Definition **kongruenter Randbedingungen** werden allgemeine Empfehlungen für die Wahl geeigneter Randbedingungen für Simulationen abgeleitet, welche beispielsweise in DIN 4108-2 (Abschnitt "Berechnungsrandbedingungen für thermische Gebäudesimulationsrechnungen") aufgenommen werden können.

Durch die erfolgreiche Validierung aller drei untersuchten Systemtypen konnte im Rahmen dieses Forschungsvorhabens gezeigt werden, dass nach aktuellem Stand der Wissenschaft die dynamische, thermisch-energetische **Simulation** von **PCM basierten Systemen** an sich zuverlässig möglich ist.

Speziell im Bereich der **aktiven** bzw. hybriden Systeme mit Lüftungstechnik und Kühldecke müssen Annahmen zur Gesamtkonzeption des Systems getroffen werden, die die Medienführung (Luft bzw. Kühlwasser) und die relevanten Regelstrategien betreffen. Schwierigkeiten bei der Bearbeitung der Forschungsfrage treten bei der Zusammenführung von Simulation und Norm auf, da sich bereits die Abbildung der jeweiligen Systeme der technischen Gebäudeausrüstung ohne PCM als problematisch gestaltet. Ohne eine entsprechende zuverlässige Abbildung der Systeme im Referenzfall ohne PCM ist eine belastbare Aussage über die Potentiale vergleichbarer Systeme inklusive PCM nicht sinnvoll möglich.

Es konnte gezeigt werden, dass sowohl für die Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes nach DIN 4108-2 als auch bei der Berechnung der Nutzenergie auf Basis von DIN V 18599 ein **Überarbeitungsbedarf** der Normenwerke identifiziert werden kann. Dies bezieht sich auf verschiedene Einzelaspekte bei den Berechnungsansätzen (z.B. Ansatz Lüftung im Kühlfall) aber auch auf die Vollständigkeit der Definition von anzusetzenden Randbedingungen (z.B. für thermische Simulationen zum sommerlichen Wärmeschutz).

2 Projektbeschreibung

2.1 Projektbeteiligte

Forschende Stellen:

- Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE), Kassel (Federführung)
- Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Holzkirchen
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg
- Ingenieurbüro Prof. Dr. Hauser GmbH, Kassel

Mitfinanzierende Stellen:

- BASF SE, Ludwigshafen
- Rubitherm Technologies GmbH, Berlin
- Gütegemeinschaft PCM e.V., Stuttgart
- Knauf Gips KG, Iphofen

Das Forschungsprojekt wird mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

2.2 Anlass / Ausgangslage

Phasenwechselmaterialien (Phase Change Materials, PCM) sind in verschiedenen Ausführungen und verschiedensten Produkten und Systemen am Markt verfügbar. Wie in zahlreichen Demonstrationsvorhaben gezeigt, können die eingesetzten Systeme durch ihre hohe spezifische Wärmekapazität positive Eigenschaften hinsichtlich des sommerlichen Wärmeverhaltens von Gebäuden sowie bezüglich der Energieeffizienz zum Heizen und Kühlen haben.

Die Wirkungsweise kann durch die detaillierte Abbildung in dynamischen Simulationsberechnungen vorhergesagt werden, eine Überprüfung der Effekte ist über den Nachweis aus bereits durchgeführten Tests in realisierten Bau- und Demonstrationsvorhaben, sowie durch Labortests möglich. Hierfür können die Ergebnisse nachträglich zum Abgleich der Simulationsrechnungen dienen, um Berechnungswerkzeuge zu verfeinern und die Vorhersagen zuverlässiger zu gestalten.

Im Rahmen von rechtlich erforderlichen Nachweisverfahren, wie beispielsweise gemäß DIN V 18599 oder DIN 4108-2, die maßgeblich für den Einsatz in der Baupraxis sind, ist eine Berücksichtigung der Effekte von PCM-Materialien und PCM-Produkten derzeit jedoch nicht explizit möglich.

2.3 Gegenstand des Forschungsvorhabens

Ziel des Vorhabens ist die Erarbeitung von Bewertungsverfahren zur Berücksichtigung von PCM-Produkten hinsichtlich:

- Steigerung der Energieeffizienz (Berücksichtigung im Rahmen des öffentlich-rechtlich vorgeschriebenen Nachweises der Energieeinsparverordnung EnEV (DIN V 18599))
- Verbesserung des sommerlichen Wärmeverhaltens von Gebäuden (Berücksichtigung im Rahmen der DIN 4108 Teil 2)

Die geplanten Untersuchungen sollen hierbei das hauptsächliche Spektrum der Einsatzgebiete, Systemvarianten und Anwendungsfälle mit Hilfe des Einsatzes von dynamischer Simulationssoftware abbilden. Aus den Berechnungen sollen neuartige Rechenansätze entwickelt werden und für die Integration in die verschiedenen normativen Berechnungsvorschriften vorbereitet werden.

3 Untersuchungsmethodik

Ziel des Forschungsprojektes ist - entsprechend des Projekttitels - die "Erarbeitung von Bewertungsverfahren zur Berücksichtigung der Eigenschaften von PCM-Produkten im Rahmen der DIN V 18599 und DIN 4108 Teil 2". Dabei geht es vor allem darum, geeignete Schnittstellen und Algorithmen (Ansätze) zu identifizieren und zu verifizieren. Der Prozess der Verifikation erfolgt mittels der Gegenüberstellung von Berechnungsergebnissen aus thermischen Gebäudesimulationen und normativen Berechnungen.

Die Untersuchungsmethodik bzw. der prinzipielle Ablauf der Untersuchungen ist in nachfolgender Abbildung zusammengefasst. Hierin ist das **Projektziel** unten mittig dargestellt. Der **vorgelagerte Prozess** erfolgt in zwei Strängen (ebenfalls mittig dargestellt), d.h. der thermischen Gebäudesimulation links und den normativen Berechnungen rechts, welche parallel für DIN 4108-2 und DIN V 18599 durchgeführt werden.

Zunächst erfolgt über alle Stränge die Definition einheitlicher und abgestimmter **Modelle und Randbedingungen**. Nicht in allen Fällen können deckungsgleiche Randbedingungen in Ansatz gebracht werden, bedingt durch die Unterschiede zwischen Simulation und normativer Berechnung, z.B. bei Vorlage von Stundenwerten einerseits und Tages- bzw. Monatsmittelwerten andererseits.

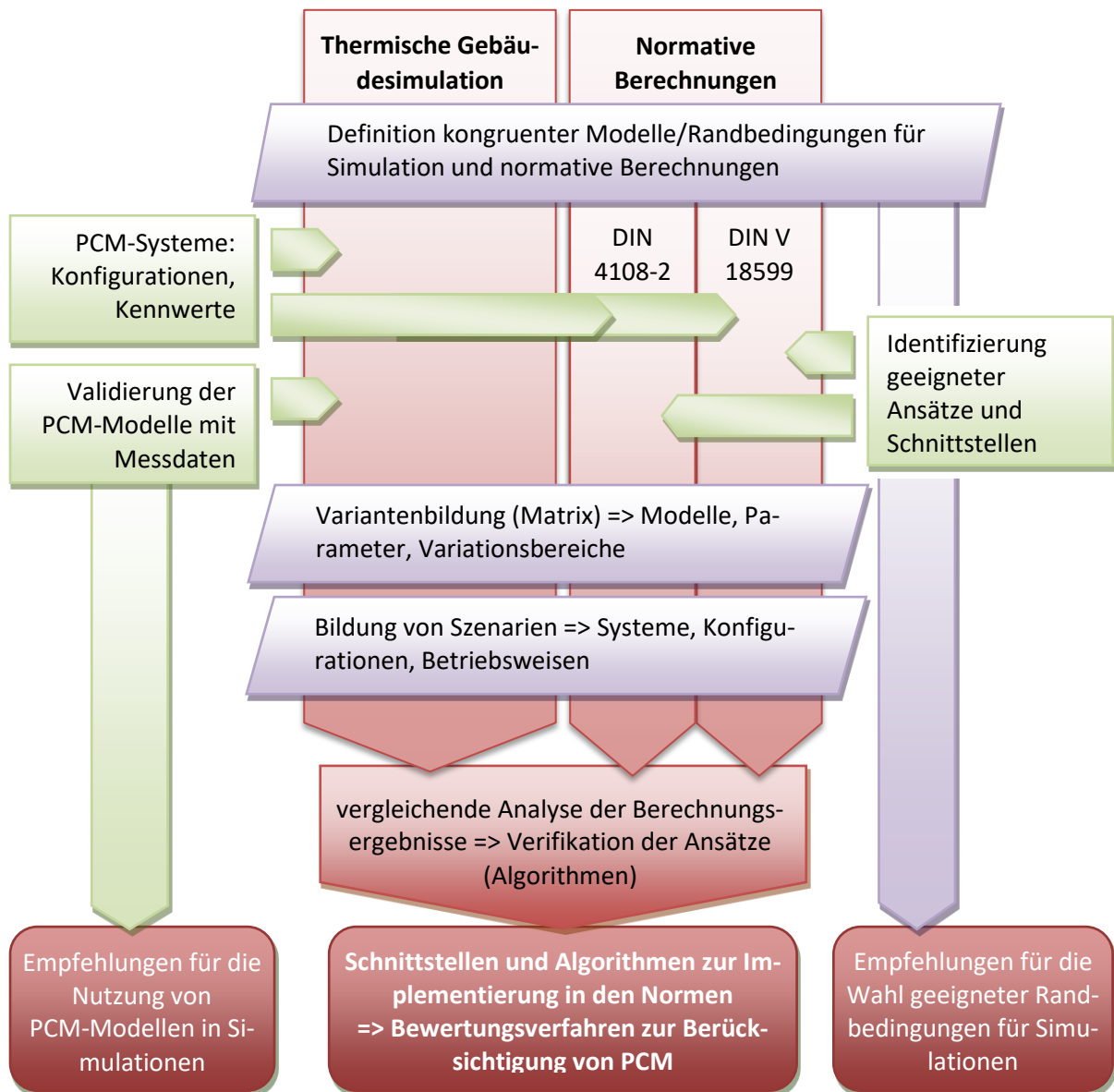


Bild 1: Graphische Darstellung der Untersuchungsmethodik.

Aus der im Projekt erarbeiteten Definition kongruenter Randbedingungen können als **zusätzliches Projektergebnis** allgemeine Empfehlungen für die Wahl geeigneter Randbedingungen für Simulationen abgeleitet werden, welche z.B. in den Text der DIN 4108-2 (Abschnitt "Berechnungsrandoberbedingungen für thermische Gebäudesimulationsrechnungen") aufgenommen werden können.

Für die Berücksichtigung von **PCM-Systemen** bzw. -Materialien müssen beide Untersuchungsstränge auf einheitliche Konfigurationen und Kennwerte zugreifen können (siehe im Bild links). Darüber hinaus ist es erforderlich, die PCM-Modelle einer **Validierung** zu unterziehen, da es sich hier - je nach System - um relativ neu entwickelte Modelle handelt, welche nicht ungeprüft in die Untersu-

chung eingehen sollten. Die Validierung erfolgt im Rahmen einer "Nebenbetrachtung" unter Verwendung geeigneter Daten aus Messungen.

Die Erkenntnisse aus dem Prozess der Validierung der PCM-Modelle können als **zusätzliches Projektergebnis** in Form von "Empfehlungen für die Nutzung von PCM-Modellen in Simulationen" herangezogen werden.

In der Graphik rechts dargestellt sind die notwendigen Vorüberlegungen zu der Frage, wo und in welcher Form die zu erarbeitenden Ansätze in die normativen Verfahren eingebaut werden sollen, d.h. die Identifizierung geeigneter **Ansätze und Schnittstellen**. Denkbar sind dabei Schnittstellen für physikalische Kenngrößen oder empirische Faktoren, welche auf bestimmte vorhandene Berechnungsparameter wirken, oder die Aufnahme neu zu entwickelnder Algorithmen zur Abbildung physikalischer Effekte, aber auch die Formulierung von textbasierten Anwendungsgrenzen, wenn z.B. eine rechnerische Berücksichtigung nur unter bestimmten Randbedingungen zulässig ist.

Weitere Voraussetzung für die Sicherstellung der Vergleichbarkeit der verschiedenen Untersuchungsmethoden ist die Erarbeitung und Festlegung geeigneter **Varianten und Szenarien**, wobei sich die Variantenbildung (in Form einer Variantenmatrix) auf die Wahl der Modelle, Parameter und Variationsbereiche bezieht, die Entwicklung von Szenarien stellt die Betriebsweisen und Konfigurationen der unterschiedlichen Systeme in den Vordergrund.

Im Ablaufdiagramm ist dann der letzte Schritt vor dem Erreichen des Ziels die vergleichende **Analyse** der Berechnungsergebnisse zur **Verifikation** der gewählten Ansätze zur Berücksichtigung der Eigenschaften von PCM-Produkten im Rahmen der Bewertungsverfahren der DIN V 18599 und DIN 4108 Teil 2.

4 Einführung in die Berechnungsverfahren

4.1 Energetische Bewertung gemäß DIN V 18599 (Monatsbilanzverfahren)

4.1.1 Energieeinsparverordnung und Normung

In Deutschland erfolgt die Formulierung bautechnischer Mindestanforderungen in Hinsicht auf Energieeffizienz und den Einsatz erneuerbarer Energien im Rahmen der Energieeinsparverordnung [1] sowie dem Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) [4].

Als Rechenverfahren für die Nachweisführung wird von der EnEV als Regelverfahren (Wohn- und Nichtwohngebäude) die Normenreihe der DIN V 18599 [2] in Bezug genommen.

4.1.2 Kurzbeschreibung der Inhalte der Norm

Die Norm gliedert sich in 11 Teile, mit der neuen Ausgabe 2016 sind 12 Teile enthalten. Die Inhalte und die Gliederung werden im Folgenden beschrieben.

Das Berechnungsverfahren der DIN V 18599 [2] basiert auf einer Monatsbilanz, wobei neben der Nutzenergie für Wärme (bisher Heizwärmebedarf) auch die Nutzenergie für Kühlung bilanziert wird (Teil 2 der Norm). Darüber hinaus wurde ein neues Verfahren für die Bilanz der Luftaufbereitung, d.h. Heizen, Kühlen sowie Be- und Entfeuchten über raumluftechnische Anlagen (RLT) ergänzt (Teil 3). Ebenfalls Bestandteil der Gesamtenergiebilanz des Gebäudes ist die Nutz- und Endenergie für Beleuchtung (Teil 4) sowie für Trinkwarmwasserbereitung (Teil 8).

Die Bewertung der Anlagentechnik und damit der Prozessbereiche Übergabe, Verteilung, Speicherung und Erzeugung erfolgt getrennt für Heizsysteme (Teil 5 und 9), Wohnungslüftungssysteme (Teil 6), RLT- und Kälteversorgungssysteme (Teil 7) sowie die Trinkwarmwasserbereitung (Teil 8 und 9).

Je nach Nutzung der Gebäude werden die Randbedingungen der Berechnung separat festgelegt (Teil 10). Die Zusammenführung der einzelnen Energieanteile und damit die umfassende Gesamtenergiebilanz sowie die Verrechnung von prozessübergreifenden Energieflüssen erfolgt in Teil 1 der Norm. Dies betrifft v.a. die Verrechnung von unregelmäßigen Wärme- und Kälteeinträgen in der Bilanz der Nutzwärme und Nutzkälte, wobei über einen iterativen Ansatz z.B. die nutzbaren Wärmeeinträge durch das Rohrleitungsnetz oder durch künstliche Beleuchtung mit bilanziert werden. In Teil 11 der Normenreihe wird die Güte der Gebäudeautomation bewertet.

4.1.3 Berechnungsansatz Nutzwärme und Nutzkälte

Der aus den bisherigen Berechnungsverfahren bekannte Berechnungsansatz für den Heizwärmebedarf (DIN V 4108-6) basiert auf der Bilanz der Wärmeverluste und -gewinne, wobei die Wärmegewinne bezüglich ihrer Nutzbarkeit gewichtet werden. In DIN V 18599-2 [5] wurde dieser Ansatz übernommen, allerdings die Begriffe im Zuge der europäischen Harmonisierung angepasst. Der Heizwärmebedarf wird nun als Nutzwärmebedarf oder Nutzwärme bezeichnet, so dass der Analogie folgend im Kühlfall die Nutzkälte bilanziert wird. Die Wärmeverluste und Wärmegewinne werden in ihrer Begrifflichkeit neutralisiert, da im Kühlfall die "Verluste" eigentlich positiv und die "Gewinne" eher negativ zu werten sind. Daher wurden die Definitionen "Wärmesenke" und "Wärmequelle" eingeführt. Die Unterscheidung von Quellen oder Senken erfolgt anhand der Temperaturdifferenzen. Im Einzelnen werden dabei die folgenden Energieanteile in die Bilanz einbezogen: Transmission, Lüftung, solare Strahlungsgewinne bzw. Abstrahlung sowie interne Wärme- oder Kälteeinträge (nutzungsbedingt oder aus Anlagentechnik).

Die Bilanzgleichungen für den Heiz- und Kühlfall sind gemäß DIN V 18599-2 allgemein wie folgt definiert

$$\text{Nutzwärmebedarf } Q_{h,b} = Q_{\text{sink}} - \eta Q_{\text{source}} \quad (1)$$

$$\text{Nutzkältebedarf } Q_{c,b} = (1 - \eta) Q_{\text{source}} \quad (2)$$

Beim Nutzwärmebedarf werden den Wärmesenken Q_{sink} die nutzbaren Wärmegewinne (ηQ_{source}) gegenübergestellt. Für den Nutzkältebedarf werden dann die nicht nutzbaren Wärmegewinne ($(1 - \eta) Q_{\text{source}}$) bilanziert. Dabei werden für Heiz- und Kühlfall unterschiedliche Randbedingungen in Ansatz gebracht, z.B. für die Bilanzinnentemperaturen. Für beide Fälle gilt, dass die Bilanz getrennt nach Nutzungs- und Nichtnutzungstagen (Wochenend- und Ferienzeiten) erfolgt, sofern keine durchgehende Nutzung vorliegt. Mit den oben genannten Gleichungen werden also unter Zugrundelegung der jeweiligen Randbedingungen der Nutzungs- und Nichtnutzungszeiten Tagesbilanzen bestimmt, die dann mittels der Anzahl der Tage zu einer Monatsbilanz aufsummiert werden.

Der Ausnutzungsgrad η stellt sicher, dass die Wärmequellen in der Bilanz nicht zu ihrer gesamten Höhe angerechnet sondern begrenzt werden. Vor allem in der Übergangszeit und im Sommer wird dadurch berücksichtigt, dass mehr Wärmeeinträge anfallen können, als im Raum zum Ausgleich der Wärmesenken nutzbar sind, wobei die Nutzbarkeit bis zu einer Erhöhung der Raumtemperatur um 2 K definiert ist.

Die nachfolgende Abbildung gibt diesen Zusammenhang beispielhaft wieder. Die monatlich anfallenden Wärmeeinträge (im Diagramm Q_{source}) sind dort in voller Höhe sowie begrenzt auf den nicht nutzbaren Anteil (im Diagramm $Q_{c,b}$) dargestellt. Die Größe bzw. der Faktor zur Festlegung der nicht nutzba-

ren Wärmegewinne entspricht dabei $(1 - \eta)$, in der Graphik auf der rechten Ordinate aufgetragen, d.h. $(1 - \eta)$.

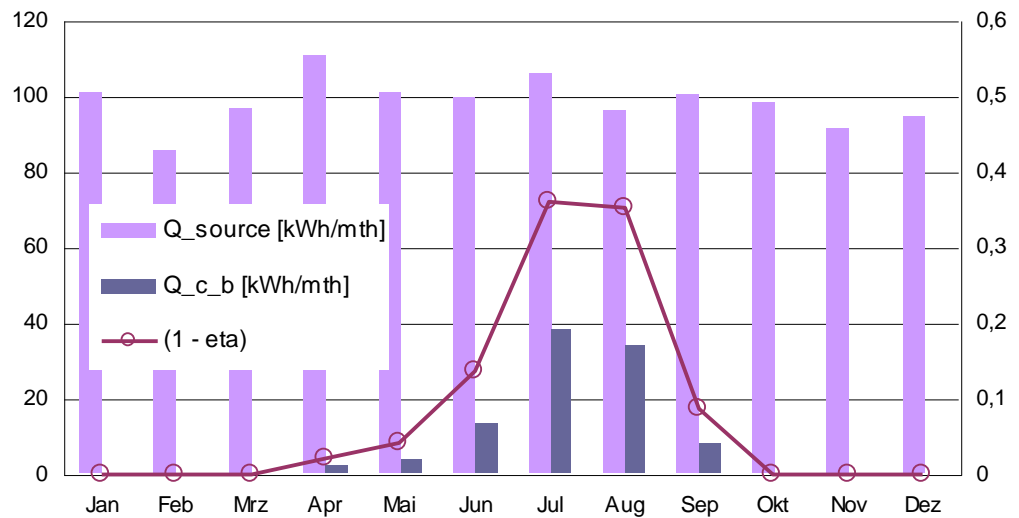


Bild 2: Beispielhafter Jahresgang der Wärmeeinträge gesamt (Q_{source}) und nicht nutzbar ($Q_{\text{c_b}}$) sowie Faktor nicht nutzbare Wärmeeinträge $(1 - \eta)$.

Die wesentlichen Berechnungsgleichungen für den Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne lauten in allgemeiner Form

$$\text{Ausnutzungsgrad } \eta = (1 - \gamma^a) / (1 - \gamma^{a+1}) \quad (3)$$

$$\text{mit } a = \tau / \tau_0 \quad (a_0 \text{ und } \tau_0 \text{ konstant})$$

$$\text{Zeitkonstante } \tau = C_{\text{wirk}} / H \quad (4)$$

$$\text{mit } H = H_T + H_V$$

$$\text{Quellen-Senkenverhältnis } \gamma = Q_{\text{source}} / Q_{\text{sink}} \quad (5)$$

Wesentliche Einflussgröße zur Bestimmung des Ausnutzungsgrades ist das Verhältnis der Wärmequellen zu den Wärmesenken γ . Weiterer Parameter ist die Zeitkonstante τ , die sich aus dem Verhältnis der Gebäudeschwere, d.h. der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} , und dem Gesamt-Wärmetransferkoeffizient H (früher spezifischer Wärmeverlust) ergibt.

4.2 Mindestanforderung an den sommerlichen Wärmeschutz gemäß DIN 4108-2

4.2.1 Anwendungsbereich

In der Einleitung zu Abschnitt 8 der DIN 4108-2 [3] zur "Bestimmung der Mindestanforderung an den sommerlichen Wärmeschutz" sind Festlegungen zum Anwendungsbereich und zur Nachweisführung enthalten. Der folgende Absatz enthält den entsprechenden Text der Norm.

"Der Nachweis zur Einhaltung der Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz ist nach 8.3 mindestens für den Raum zu führen, der im Rahmen des Anwendungsbereichs zu den höchsten Anforderungen des sommerlichen Wärmeschutzes führt.

Alternativ kann das Verfahren nach 8.4 durch thermische Gebäudesimulation und den Nachweis der Einhaltung des zulässigen Anforderungswertes nach Tabelle 9 zur Anwendung kommen.

Die Anforderungen gelten nicht für Räume hinter Schaufenstern und ähnlichen Einrichtungen. "

Im Rahmen der Bestimmung der Mindestanforderungen kann auf den Nachweis verzichtet werden, wenn die unten aufgeführten Voraussetzungen gegeben sind (Text der Norm).

"a) Liegt der Fensterflächenanteil unter den in Tabelle 6 angegebenen Grenzen, so darf auf einen Nachweis verzichtet werden.

Tabelle 1: Zulässige Werte des Grundflächen bezogenen Fensterflächenanteils, unterhalb dessen auf einen sommerlichen Wärmeschutznachweis verzichtet werden kann.

Spalte Zeile	1 Neigung der Fenster gegenüber der Horizontalen	2 Orientierung der Fenster ^a	3 Grundflächen bezogener Fensterflächenanteil ^b f_{WG} [%]
1	über 60° bis 90°	Nordwest- über Süd bis Nordost	10
2	über 60° bis 90°	Alle anderen Orientierungen	15
3	von 0° bis 60°	Alle Orientierungen	7

^{a)} Sind beim betrachteten Raum mehrere Orientierungen mit Fenstern vorhanden, ist der kleinere Grenzwert für f_{WG} bestimmend.

^{b)} Der Fensterflächenanteil f_{WG} ergibt sich aus dem Verhältnis der Fensterfläche (siehe Bild 2) zu der Grundfläche des betrachteten Raumes oder der Raumgruppe. Sind beim betrachteten Raum bzw. der Raumgruppe mehrere Fassaden oder z. B. Erker vorhanden, ist f_{WG} aus der Summe aller Fensterflächen zur Grundfläche zu berechnen.

b) Bei Wohngebäuden sowie bei Gebäudeteilen zur Wohnnutzung, bei denen der kritische Raum einen grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil von 35% nicht überschreitet, und deren Fenster in Ost-, Süd- oder Westorientierung (inkl. derer eines Glasvorbaus) mit außenliegenden Sonnenschutzvorrichtungen mit einem Abminderungsfaktor $F_c \leq 0,30$ bei Glas mit $g > 0,40$ bzw. $F_c \leq 0,35$ bei Glas mit $g \leq 0,40$ (siehe Tabelle 7) ausgestattet sind, kann auf einen Nachweis verzichtet werden. Ein Glasvorbau wird nicht als kritischer Raum herangezogen."

Das Verfahren der Sonneneintragskennwerte wird in DIN 4108-2 in Abschnitt 8.3 behandelt. Unter "Allgemeines" werden die Grenzen der Anwendbarkeit aufgeführt. Im Folgenden ist der entsprechende Text der Norm wiedergegeben.

"Nicht geführt werden kann der Nachweis mit dem in diesem Abschnitt beschriebenen vereinfachten Verfahren, wenn die für den Nachweis in Frage kommenden Räume oder Raumbereiche in Verbindung mit folgenden baulichen Einrichtungen stehen:

- Doppelfassaden oder*
- transparente Wärmedämmsysteme (TWD). "*

Es sind also nur Grenzen der Anwendbarkeit im Bereich der baulichen Ausführung definiert und es werden keine Ausschlusskriterien aus der Anlagentechnik abgeleitet. Daher ist das Verfahren auch bei Einsatz von Kühl- oder Klimatechnik anwendbar.

4.2.2 Vereinfachtes Verfahren, Sonneneintragskennwerte

Das vereinfachte Nachweisverfahren für die Mindestanforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz gemäß DIN 4108-2 [3] beruht auf der Bestimmung des Sonneneintragskennwertes. Hierbei wird aus den vorliegenden Bedingungen eines Einzelraums ein vorhandener (S_{vorh}) sowie ein zulässiger Maximalwert (S_{zul}) bestimmt. Der Nachweis selbst, d.h. die Einhaltung des Mindestwärmeschutzes ist über die Ungleichung

$$S_{vorh} \leq S_{zul} \quad (6)$$

definiert. Die Auswahl des oder ggf. der betrachteten Einzelräume bezieht sich dabei auf den kritischsten Fall.

Der vorhandene Sonneneintragskennwert S_{vorh} ergibt sich aus der Summe der Fensterflächen A_w (Rohbaumaß) multipliziert mit den jeweiligen Gesamtenergiedurchlassgraden (Glas einschließlich Sonnenschutz $g_{tot,j}$) bezogen auf die Grundfläche des Raums/Bereichs A_G .

$$S_{vorh} = \frac{\sum_j A_{w,j} \cdot g_{tot,j}}{A_G} \quad (7)$$

Der Gesamtenergiedurchlassgrad des Glases einschließlich Sonnenschutz g_{tot} kann vereinfacht nach der Gleichung ($g_{tot} = g F_c$) berechnet werden. Alternativ kann das Berechnungsverfahren für g_{tot} nach DIN V 4108-6, Anhang B verwendet werden.

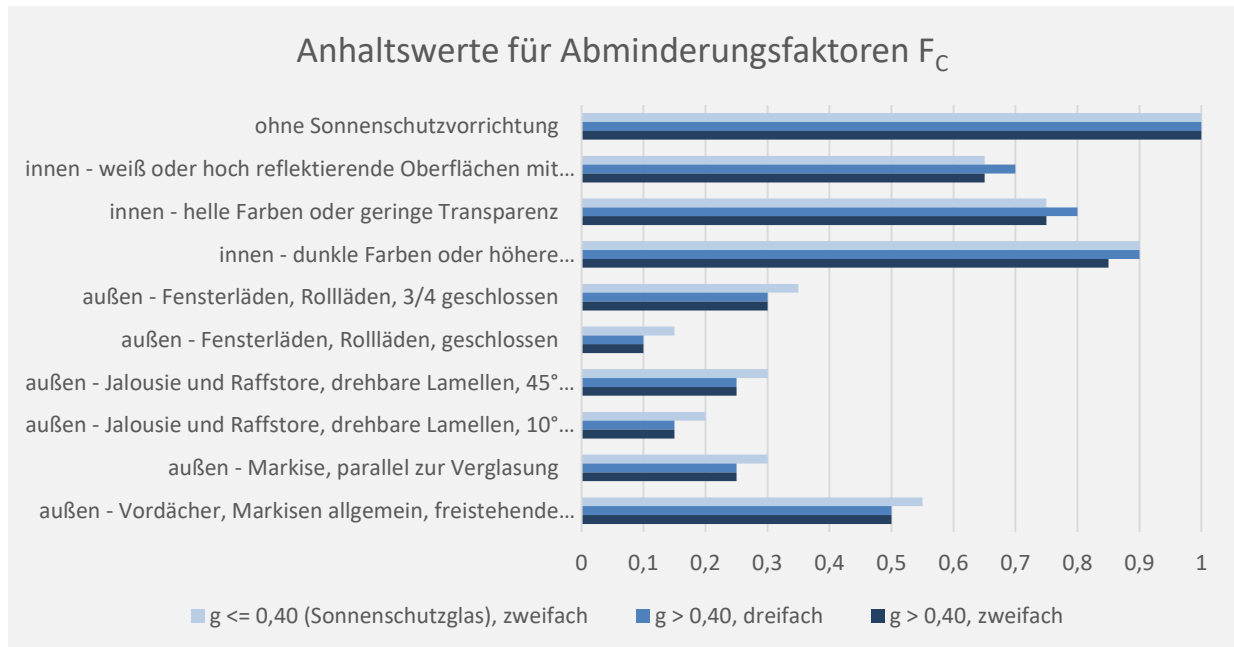


Bild 3: Anhaltswerte für Abminderungsfaktoren F_c von fest installierten Sonnenschutzvorrichtungen in Abhängigkeit vom Glaserzeugnis, d.h. Sonnenschutzglas ($g \leq 0,4$), Drei- sowie Zweifachglas (jeweils $g > 0,4$). [3]

Der höchstens zulässige Sonneneintragskennwert S_{zul} ergibt sich nach folgender Gleichung.

$$S_{zul} = \sum S_x \quad (8)$$

Zusammengefasst sind folgende Einflüsse zu berücksichtigen

- Nutzung: Wohngebäude und Nichtwohngebäude
- Außenklima: Deutschland aufgeteilt in 3 Klimazonen, d.h. sommerkühl, gemäßigt und sommerheiß
- Geometrie: Fensterflächenanteil, Verhältnis von Fensterfläche zu Grundfläche des Raumes sowie Fensterorientierung und -neigung
- Verglasung/Sonnenschutz: Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung (g) und Wirksamkeit der Sonnenschutzvorrichtung (F_c)
- Bauart: wirksame Wärmespeicherfähigkeit der raumumschließenden Flächen, aufgeteilt in 3 Klassen, d.h. leichte, mittlere und schwere Bauart

- Lüftung: eventuell vorhandene erhöhte ($n \geq 2 \text{ h}^{-1}$) bzw. hohe ($n \geq 5 \text{ h}^{-1}$) Nachtlüftung, abhängig von Gebäudeschwere und Nutzung
- Passive Kühlung: falls vorhanden, abhängig von Gebäudeschwere

4.2.3 Nachweis mittels thermischer Gebäudesimulation

In DIN 4108-2 ist darüber hinaus festgelegt, dass insbesondere, wenn die Anwendbarkeit des vereinfachten Verfahrens ausgeschlossen ist, zur Bewertung der thermischen Verhältnisse eine dynamisch-thermische Simulationsrechnung durchzuführen ist. Dafür werden in der Norm zahlreiche einheitliche Randbedingungen vorgegeben, um - als wesentliche Voraussetzung für die Nachweisführung - die bei Simulationsrechnungen mögliche Vielzahl unterschiedlicher Einflüsse zu begrenzen. Neben der "Muss-Bestimmung" bei Fällen außerhalb des Anwendungsbereichs des vereinfachten Verfahrens kann die Simulation auch allgemein als alternatives Nachweisverfahren zur Anwendung kommen.

Für die Bewertung der thermischen Behaglichkeit in Innenräumen werden zur Nachweisführung drei verschiedene Bezugswerte der operativen Innentemperaturen in Abhängigkeit von den drei Sommer-Klimaregionen (A, B und C) vorgegeben. Im Rahmen der Nachweisführung ist unter Zugrundelegung des jeweils geltenden Bezugswerts der operativen Innentemperatur nachzuweisen, dass im kritischen Raum des zu bewertenden Gebäudes der Anforderungswert für die Übertemperaturgradstunden nicht überschritten wird.

In Abhängigkeit von der Nutzungsart wird die übliche Anwesenheitszeit (Wohnnutzung 24 h/d; Nichtwohnnutzung Montag bis Freitag 7 Uhr bis 18 Uhr) als Bezugszeit für den zu bestimmenden Übertemperaturgradstundenwert zugrunde gelegt.

Tabelle 2: Zugrunde gelegte Bezugswerte der operativen Innentemperatur für die Sommerklimaregionen und Übertemperaturgradstundenanforderungswerte gemäß DIN 4108-2.

Sommerklimaregion	Bezugswert $\theta_{b,op}$ der Innentemperatur [°C]	Anforderungswert Übertemperaturgradstunden [Kh/a]	
		Wohngebäude	Nichtwohngebäude
A (Rostock)	25	1.200	500
B (Potsdam)	26		
C (Mannheim)	27		

Die Norm enthält noch zwei Anmerkungen zu den Festlegungen:

- Eine unterschiedliche Festlegung des Bezugswertes der operativen Innentemperatur ist wegen der Adaption des Menschen an das vorherrschende Außenklima gewählt. Würde in allen Regionen dieselbe Anforderungswert zugrunde gelegt, würde dies zu einer Überdimensionierung der Gebäude führen.

derung an das sommerliche Raumklima wie in der Sommer-Klimaregion A gestellt, könnte in den Sommerklimaregionen B und C keine für die Tageslichtbeleuchtung ausreichende Fenstergröße zugelassen werden.

- Die angegebenen Bezugswerte der operativen Innentemperaturen sind nicht im Sinne von zulässigen Höchstwerten für Innentemperaturen zu verstehen. Sie dürfen nutzungsabhängig in dem durch die Übertemperaturgradstundenanforderungswerte vorgegebenen Maß überschritten werden. Insbesondere wegen standardisierter Randbedingungen erlauben die Berechnungsergebnisse nur bedingt Rückschlüsse auf tatsächliche Überschreitungshäufigkeiten.

4.3 Thermische Gebäudesimulation

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts werden die Untersuchungen mittels dynamischer thermischer Simulation mit den Programmen TRNSYS und esp-r durchgeführt. Mit den Simulationsprogrammen werden die sich im Jahresverlauf oder bei periodischen Randbedingungen einstellenden Raumluftzustände und Lastverläufe ermittelt. Die Angabe der klimatischen Randbedingungen und die Auswertungen erfolgen dabei mindestens in Stundenwerten (8760-Werte für das Jahr oder zyklische 24h-Periode), der eigentliche Berechnungszeitschritt liegt in der Regel eine Größenordnung darunter. Die Simulationstechnik ermöglicht die Bewertung einzelner Einflussgrößen bei sonst gleichen Randbedingungen und erlaubt somit den exakten Vergleich des Einflusses verschiedener Parameter.

Das thermische Verhalten wird auf der Grundlage umfangreicher Simulationsrechnungen bewertet. Für ausgewählte Raumgeometrien erfolgt eine umfassende Parametervariation der wesentlichen Einflussgrößen. Als Randbedingungen werden die für die Gebäude üblichen Annahmen für Wohn- und Nichtwohnungen getroffen, sofern nicht im Rahmen der normativen Berechnungsverfahren explizite Randbedingungen vorgegeben sind.

5 Mögliche Schnittstellen zu den Verfahren der Norm

Zur Berücksichtigung der Effekte von PCM-haltigen Komponenten im Rahmen von thermischen Simulationen liegen für unterschiedliche Simulationswerkzeuge bereits Lösungen vor, z.B. für TRNSYS in Form von zusätzlichen Modell-Komponenten (in TRNSYS "Types" genannt) zur Modellierung der Systeme. Maßgeblich für den Einsatz in der Baupraxis ist jedoch die Möglichkeit, diese Systeme auch im Rahmen von rechtlichen Nachweisverfahren bewerten zu können. Dies ist für die beiden relevanten Verfahren (EnEV, sommerlicher Mindestwärmeschutz) derzeit nicht möglich. Ziel des vorliegenden Forschungsprojektes ist es, diese Bewertung zu ermöglichen und zu quantifizieren. Dafür sind geeignete Schnittstellen zu finden.

Bei der Prüfung möglicher Schnittstellung und deren Eignung ist der wesentliche Unterschied zwischen der thermischen Simulation und den Verfahren der DIN V 18599 bzw. DIN 4108-2 zu berücksichtigen, d.h. die unterschiedlichen zugrunde liegenden Zeitschrittweiten.

- Die Simulation erfolgt i.d.R. auf Stundenbasis, ggf. auch in kleineren Zeitschritten wie z.B. 6 min.
- Das Verfahren der DIN V 18599 wird als Monatsbilanz bezeichnet, basiert aber eigentlich auf Tagesmittelwerten (der Nutzenergie für Heizen und Kühlen). Es kann jedoch kein Tagesgang abgebildet werden, z.B. Schwankungen der Temperaturen aufgrund solarer Einstrahlung. Darüber hinaus werden Energien bzw. Lasten bestimmt, keine Temperaturen, wodurch auch keine Komfortbewertung erfolgen kann.
- Mit dem Verfahren der Sonneneintragskennwerte gem. DIN 4108-2 kann ein extremer Zustand rechnerisch abgebildet werden.

Eine physikalisch korrekte Abbildung des thermischen Verhaltens der PCM-haltigen Komponenten ist daher in den normativen Verfahren aufgrund der unterschiedlichen Berechnungsansätze nicht möglich. Es sind daher Lösungen/Schnittstellen zu finden, mit deren Hilfe der Effekt in geeigneter Größenordnung indirekt berücksichtigt werden kann.

Welche Berechnungsgrößen herangezogen werden, um den Effekt des PCM-Einsatzes abzubilden, hängt im Wesentlichen von der durch die Simulationsrechnungen festzulegenden Größenordnungen ab und deren Dynamik. Dabei können Größen mit direkter physikalischer Entsprechung in Frage kommen, z.B. Bauteilkennwerte, wirksame Wärmespeicherfähigkeit und die Bilanzinnentemperatur, aber auch abstraktere Größen, welche z.B. als Faktoren und Zu-/Abschlagswerte lediglich die rechnerische Größe beeinflussen können.

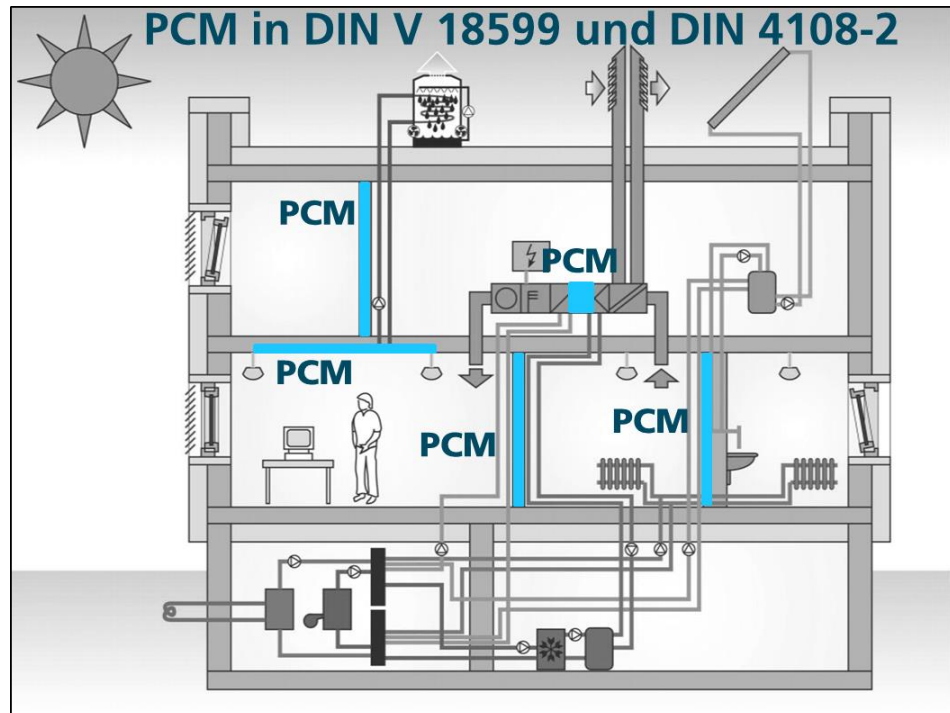


Bild 4: Betrachtete Integrationsmöglichkeiten von PCM in Gebäuden und deren Raumbilanzierungen im Hinblick auf die DIN V 18599.

Dabei werden z.B. für das Verfahren der DIN V 18599 im Wesentlichen die folgenden zwei möglichen Schnittstellen geprüft:

- **Wirksame Wärmespeicherfähigkeit:**
Sie findet im Berechnungsverfahren an unterschiedlichen Stellen Verwendung und beeinflusst die rechnerische Abbildung verschiedener physikalischer Effekte, d.h. bei der Bilanzinnentemperatur (Heizfall), bei der Bestimmung des Ausnutzungsgrads der Wärmequellen (Heiz- und Kühlfall) und bei der Abschätzung der maximalen Heiz- und Kühlleistung.
- **Bilanzinnentemperatur:**
Bei der rechnerischen Bestimmung werden bereits verschiedene physikalischer Effekte berücksichtigt, d.h.
 - Soll-Innentemperaturen (Heizfall, Nutzungsabhängig)
 - Nachtabenkung/-abschaltung (Dauer, Randbedingungen)
 - Wochenendabsenkung/-abschaltung (Dauer, Randbedingungen)
 - ggf. auch Ferienbetrieb
 - Teilbeheizung (Wohngebäude)
 - Gebäudeautomation, adaptiver Betrieb
 - Wärmespeicherfähigkeit

6 Variantenbildung

Die im Rahmen des Forschungsprojekts behandelten PCM-Systeme beziehen sich auf die folgenden drei Systemgruppen bzw. Einsatzbereiche:

- Bauplatten,
- Lüftungssysteme sowie
- Kühldecken.

Zwischen den forschenden Stellen sowie den mitfinanzierenden Beteiligten (Hersteller) wurden die zu behandelnden Varianten in Form von Variantenmatrizen abgestimmt. Im Folgenden sind die Varianten tabellarisch für die verschiedenen Bereiche aufgeführt.

Die hier dargestellten Parametervariationen stellen den Planungsstand vor Durchführung dar. Wie die Ausführungen zur Interpretation der Ergebnisse zeigen, stellten sich in der weiteren Projektbearbeitung verschiedene Probleme und Anwendungsgrenzen ein, durch welche die umfassende Behandlung aller hier dargestellten geplanten Variationen nicht in allen Fällen sinnvoll gewährleistet werden konnte.

6.1 Gebäude (Nutzung, Geometrie, Bauteile)

Sowohl die PCM-Bauplatte als auch eine Integration von PCM in Lüftungssystemen haben ihre Hauptanwendungsfälle im Bereich der Wohngebäude, der Bürogebäude und in Schulräumen. Demgegenüber sind aktiv betriebene (PCM)-Kühldecken vor allem im Bereich der Bürogebäude zu finden. Um eine Vergleichbarkeit der Technologieansätze zu gewährleisten, wurde im vorliegenden Forschungsvorhaben die Betrachtung der Büroanwendungen in den Vordergrund gestellt. Die Variantenbildung bezüglich des Gebäudes ist in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 3: Variantenmatrix Gebäude.

	Bauplatte	Kühldecke	Lüftung
Klimazone	Potsdam; Region C; Region A	Potsdam; Region C; Region A	Potsdam; Region C; Region A
Fensterflächenanteil	0,3; 0,5; 0,7; 1	0,3; 0,5; 0,7; 1	0,3; 0,5; 0,7; 1
Gesamtenergiedurchlassgrad Glas g	0,6	0,6	0,6
Minderung durch Verschattung F_c	0; 0,2; 0,5; 1	0; 0,2; 0,5; 1	0; 0,2; 0,5; 1
Bauteile Qualität	EnEV 2009; EnEV 2016	EnEV 2009; EnEV 2016	EnEV 2009; EnEV 2016
Bauteile Masse	Ausführung leicht; mittel; schwer	Ausführung leicht; mittel; schwer	Ausführung leicht; mittel; schwer

¹⁾ Bezeichnungen bisher "sommerheiß" entspricht jetzt "Region C", "sommerkühl" entspricht "Region A" und "gemäßigt" entspricht "Region B".

Die Nutzungen werden mit verschiedenen Parametersätzen gemäß der Definition der Nutzungsprofile aus DIN V 18599-10 hinterlegt, ebenso beziehen sich die Klimadaten auf diese Norm (Referenzstandort Potsdam) bzw. auf weitere Klimadatenätze des DWD, welche auch in DIN 4108-2 genannt sind (sommerheiß, sommerkühl).

Es gibt verschiedene Einflüsse auf die Wärmeeinträge durch solare Einstrahlung über Fenster, d.h. Fenstergröße bzw. Fensterflächenanteil, Rahmenanteil, Verglasungskennwerte (g-Wert, ggf. U-Wert), Verschattungsvorrichtungen (g_{tot} oder F_c , Steuerung), Verbauung (F_s) sowie Strahlungsangebot (Orientierung/Neigung, Klimaregion/-daten). Die meisten Einflussgrößen wirken sich direkt proportional auf die Höhe der Wärmeeinträge aus.

Daher kann die Variantenbildung in diesem Bereich vereinfacht werden. Der rechnerische Einfluss eines geringen Fensterflächenanteils von z.B. 30% bei einer Standard-Verglasung ($g = 0,6$) liegt in der gleichen Größenordnung wie eine Sonnenschutzverglasung ($g = 0,4$) bei einem Fensterflächenanteil von 50%, ebenso wie Aktivierung einer guten Sonnenschutzvorrichtung ($F_c = 0,2$) in Kombination mit einer fast vollflächigen Verglasung von 90%. Die separate Variation des g-Wertes kann daher entfallen.

Die Qualität der **Bauteile** entspricht einem vollständigen Datensatz (U , g , α), welcher unter Berücksichtigung unterschiedlicher Wärmeschutzniveaus gemäß EnEV hergeleitet wird. Die Klassierung der Masse entspricht den Ansätzen der normativen Berechnungen (leicht, mittel, schwer).

6.2 Gebäudemodell (Einraummodul)

Tabelle 4: Variantenmatrix Gebäude.

	Bürogebäude
Gebäudemodell	Raummodul 20 m ²
Platzierung im Gebäude	Zentralraum; Eckraum
Orientierung	N; S; O; W

Bei der Betrachtung der Bürogebäude wurden, wie in Tabelle 4 dargestellt, ein Zentral- und ein Eckraum betrachtet. Für den Zentralraum wurde dabei eine Fassadenfläche mit einem Fenster vorgesehen, der Eckraum hat zwei Fassaden mit jeweils einem Fenster. Der Eckraum stellt dabei den Extremfall hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes dar.

Raummodule mit Dachabschlüssen (Schräg-/Flachdach, oberste Geschossdecke) oder Bodenabschlüssen werden für die vorliegenden Untersuchungen nicht verwendet, da sie keine Wesentlichen weiteren Einflüsse abbilden, welche im Rahmen der Studien benötigt werden.

6.3 Gebäudetechnik

Im Bereich der Gebäudetechnik sind einige Randbedingungen schon durch die Ausführung der verschiedenen Systeme vorgegeben, siehe Spalte Kühldecke und Lüftung.

Tabelle 5: Variantenmatrix Gebäudetechnik.

	Baustoffe	Kühldecke	Lüftung	Anmerkung
Wärmeüber-gabe	Heizkörper; Fußboden	Heizkörper; Fußboden	Heizkörper; Fußboden	
Lüftung	Fensterlüftung	Fensterlüftung	Zu-/Abluftanlage mit WRG	WRG 80%
Kühltechnik	keine	Kühldecke	keine	
Kühldecke: Regeneration	-	Nachtlüftung; Wasser regenerativ; Kaltwassersatz	-	Betriebszeit nachts
Nachtlüftung	ohne; Fenster	ohne; Fenster	ohne; Lüftungsanlage	

6.4 Kühldecke und PCM

Aus der Variantenbildung im Bereich der Kühldecke/des PCM-Materials ergeben sich verschiedene Konfigurationen und Materialkennwerte, unter Berücksichtigung der Anforderungen der unterschiedlichen Systeme.

Tabelle 6: Variantenmatrix PCM.

	Baustoffe	Kühldecke	Lüftung	Anmerkung
Erstarrungs-/ Schmelzpunkte [°C]	Paraffin 22/23; Paraffin 24/25; Salzhydrat 20/23; Salzhydrat 22/25	Paraffin 22/23; Salzhydrat 20/23	Paraffin 22/23; Paraffin 24/25; Salzhydrat 20/23; Salzhydrat 22/25	Schmelzbereichsbreite 4 K
Menge PCM	300 kJ/m ² ; 600 kJ/m ²	300 kJ/m ² ; 600 kJ/m ² ; 900 kJ/m ²	0,25 kg/(m ³ /h); 0,5 kg/(m ³ /h)	
Bezugsgröße für Menge	Grundfläche Raum	Fläche Kühldecke	Volumenstrom	
Baustoffe: Belegung	Wand; Decke; Wand und Decke	-	-	
Lüftung: Bypass möglich	-	-	ja; nein	

7 Funktionsbeschreibung PCM-Systeme

Im Folgenden sind die wesentlichen Eigenschaften verschiedener PCM-Systeme beschrieben. Die Texte sind z.T. auch auf der Internetseite "PCM-Demo II" [6] aufgeführt, ein vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie BMWi gefördertes Rahmenprojekt, bei dem es zu einigen Einzelprojekten Schnittstellen mit den Beteiligten des vorliegend Projektes gibt.

7.1 Passive PCM-Flächenkühlsysteme

Unter passiven PCM-Flächenkühlsystemen werden hier Systeme verstanden, bei denen das PCM zur Flächenkühlung in die Raumbooberflächen (Decken, Wände) eingebracht ist und die Kühlwirkung ausschließlich passiv durch vorhandene Temperaturdifferenzen zwischen Raumbooberfläche und PCM über Konvektion und Strahlung erfolgt. Die Regeneration des PCM erfolgt dabei ebenfalls rein passiv, ohne Kälteerzeugung, über z.B. Nachtlüftung. Passive Systeme unterliegen generell in ihrer Funktion engen physikalischen Grenzen. So kann die Funktion nur gewährleistet werden, wenn eine nächtliche Regeneration möglich ist. Der Einsatz einer passiven Kühlung ist nur sinnvoll, wenn nächtlich höhere Temperaturen toleriert werden können.

Um die passiven PCM-Flächenkühlsysteme sinnvoll und energieeffizient betreiben zu können sollten nachfolgende Punkte immer beachtet werden:

- Wärmeeinträge in die Räume sind so weit möglich zu reduzieren. Außenliegender Sonnenschutz sollte eingesetzt und sinnvoll nachgeregelt werden um den Solarenergieeintrag möglichst gering zu halten und Energieeffizienzpotentiale, z.B. bei elektrischen Verbrauchern, genutzt werden.
- Die vollständige Regeneration des PCM muss nach erfolgter Aktivierung (auch bei nur teilweisem Aufschmelzen) sichergestellt werden, dies geschieht durch nächtliche Regeneration über Nachtlüftung. Hier empfiehlt sich eine automatische Regelung über z.B. Zuluftklappen oder Fenstersteller die temperaturgeregelt öffnen und schließen (Regenerationsbetrieb an, wenn Außenlufttemperatur < Raumlufthtemperatur). Um hohe Luftwechselraten zu ermöglichen ist eine Querlüftung empfehlenswert. Bei Vorhandensein einer mechanischen Lüftungsanlage sollte diese nachts einen erhöhten Luftwechsel fahren (> 3-4 Luftwechsel pro Stunde empfehlenswert) der über eine Temperaturregelung (an wenn Außenlufttemperatur < Raumlufthtemperatur) gesteuert wird.
- Um eine zu starke Auskühlung des Raumes in der Übergangszeit zu vermeiden sollte zusätzlich eine Abschaltung der Nachtlüftung erfolgen (z.B. wenn Raumlufthtemperatur < 20°C).

- Um die Regeneration möglichst energieeffizient zu betreiben sollte weiterhin ein Abschaltkriterium bei erfolgter vollständiger Regeneration des PCM vorgesehen werden (z.B. PCM-Temperatur < Schmelztemperatur). Dies ist jedoch Systemabhängig und es muss vor allem eine mögliche Unterkühlung des PCM berücksichtigt werden.
- Um die Kühllasten möglichst gering zu halten sollten die Fenster nur dann geöffnet sein, wenn die Außenluft kühler ist als die Raumluft.
- Die mit dem PCM belegten Flächen sollten frei zugänglich und nicht durch z.B. Schränke/Regale verstellt sein. In der Regel sind daher Deckenflächen am besten geeignet.

Auch wenn der Haupteinsatz von passiven PCM-Systemen im Bereich der Gebäude ohne aktive Kältebereitschaft gesehen wird, ist neben den Gebäuden ohne Zusatzsysteme ein Integration passiver PCM-Systeme auch bei Gebäuden mit Zusatzsystemen denkbar. Eine mögliche Auswahl verdeutlicht nachfolgende Tabelle.

Tabelle 7: Mögliche Kältebereitstellungskonzepte bei PCM in Baustoffen.

PCM in Baustoffen		
Variante	Beschreibung	
	System ohne PCM	System mit PCM
1	Keine Kühltechnik	
2	Kühltechnik nötig	Keine Kühltechnik nötig
3	Kühlung über KKM auf maximal 26°C (bzw. gleitend mit Außentemperatur)	
4	Kühlung über Grundwasser ganztags	
4	Kühlung über Grundwasser bedarfsorientiert ganztags	
5	Kühlung über Grundwasser ganztags	Kühlung über Grundwasser überwiegend nachts
6	Kühlung über KKM auf maximal 26°C (bzw. gleitend mit Außentemperatur)	Kühlung über maschinelle Nachtlüftung
7	Kühlung über KKM	Kühlung weitestgehend über Rückkühlwerk durch Verschiebung Rückkühlbetrieb in Nachtstunden

Literatur

VDI 2164:2015-02 PCM-Energiespeichersysteme in der Gebäudetechnik [7]

7.2 Aktive PCM-Flächenkühlsysteme

Unter aktiven PCM-Flächenkühlsystemen werden hier Systeme verstanden, bei denen das PCM zur Flächenkühlung in die Raumbooberflächen (Decken, Wände) eingebracht ist und das System zusätzlich zur rein passiven Kühlwirkung des PCM auch aktiv mit einem Kältefluid (z.B. Wasser) durchströmt werden kann. Die aktive Durchströmung kann dabei in zwei Fällen eingesetzt werden:

- Im Kühlfall zu Spitzenlastzeiten, wenn die passive Kühlleistung des PCM nicht mehr ausreichend ist.
- Zur Regeneration des PCM (typischerweise nachts oder außerhalb der Nutzungszeiten).

Die Vorteile der aktiven PCM-Flächenkühlsysteme gegenüber der rein passiven Ausführung sind:

- Größere Betriebssicherheit im Kühlfall durch Zuschaltmöglichkeit des aktiven Kühlkreises, wodurch eine höhere Kühlleistung erreicht werden kann.
- Gewährleistete Regeneration des PCM.
- Durch zeitlich alternierende Kombination mit weiteren aktiven Kühlsystemen (z.B. Konvektoren) höhere Auslastung der verfügbaren Kälte-technik. Tagsüber aktive Kühlsysteme, nachts Regeneration des PCM.

Die Regeneration erfolgt dabei idealerweise zu Zeiten, in denen die Kälte effizient erzeugt und bereitgestellt werden kann, z.B. nachts bei geringeren Außenlufttemperaturen.

Um die aktiven PCM-Flächenkühlsysteme sinnvoll und energieeffizient betreiben zu können sollten nachfolgende Punkte zur Regelung immer beachtet werden:

- Wärmeeinträge in die Räume sind so weit möglich zu reduzieren. Außenliegender Sonnenschutz sollte eingesetzt und sinnvoll nachgeregelt werden um den Solarenergieeintrag möglichst gering zu halten und Energieeffizienzpotentiale, z.B. bei elektrischen Verbrauchern, genutzt werden.
- Die mit dem PCM belegten Flächen sollten frei zugänglich und nicht durch z.B. Schränke/Regale verstellt sein.
- Die Kristallisationstemperatur des PCM ist so zu wählen, dass eine möglichst effiziente aktive Regeneration möglich ist. Sie sollte daher mindestens 3K über dem verfügbaren Kälteniveau liegen. Eine Unterkühlung

des PCM (Beginn der Kristallisation erst unterhalb der Schmelztemperatur) ist dabei unbedingt zu berücksichtigen. Ebenso sind Taupunktunterschreitungen zu vermeiden.

- Die vollständige Regeneration des PCM muss nach erfolgter Aktivierung (auch bei nur teilweisem Aufschmelzen) sichergestellt werden, dies geschieht typischerweise durch aktive nächtliche Regeneration. Die vollständige Regeneration des PCM sollte durch eine
- sinnvolle Regelgröße mit Abschaltkriterium (z.B. Rücklauftemperatur < Erstarrungstemperatur; aber mögliche Unterkühlung berücksichtigen!) sichergestellt werden.
- Die Kühlgrenztemperatur, ab der die aktive Kühlung zugeschaltet wird, sollte deutlich über der Schmelztemperatur des PCM liegen, um eine passive Kühlwirkung des PCM überhaupt erst zu ermöglichen. Grundsätzlich gilt, je höher die Differenz zwischen Kühlgrenztemperatur und PCM-Schmelztemperatur, desto höher ist die nutzbare passive Kühlleistung des PCM. Wir empfehlen die Kühlgrenztemperatur mindestens 4K höher anzusetzen als die Schmelztemperatur des PCM.
- Um die Kühllasten möglichst gering zu halten sollten die Fenster nur dann geöffnet sein, wenn die Außenluft kühler ist als die Raumluft.

Bezüglich der Betriebsweisen und der Integration der benötigten Kältequellen sind verschiedene Varianten denkbar. Diese reichen von der Nutzung von Grundwasser zur Regeneration des PCM (z.B. unter der Annahme, dass die zur Verfügung stehende Kälteleistung bei reinem Tagbetrieb für das Gebäude nicht ausreichend ist), der Nutzung von Nass- und Trockenrückkühlwerken (deren Betrieb durch die Verwendung von PCM in die Nachtstunden verschoben wird) bis hin zur Verschiebung des Betriebs einer konventionellen Kältemaschine in die Nachtstunden. Eine Zusammenstellung möglicher Systemvarianten verdeutlicht nachfolgende Tabelle.

Tabelle 8: Mögliche Kältebereitstellungskonzepte bei PCM in Baustoffen.

PCM in aktiven Kühldecken		
Variante	Beschreibung	
	System ohne PCM	System mit PCM
1	Kühlung über KKM auf maximal 26°C (bzw. gleitend mit Außentemperatur)	
2	Kühlung über Grundwasser ganztags	
3	Kühlung über Grundwasser ganztags	Kühlung über Grundwasser überwiegend nachts
4	Kühlung über Grundwasser tagsüber	Kühlung über Grundwasser überwiegend nachts
5	Kühlung über KKM	Kühlung weitestgehend über Trocken-Rückkühlwerk durch Verschiebung Rückkühlbetrieb in Nachtstunden
6	Kühlung über KKM	Kühlung weitestgehend über Nass-Rückkühlwerk durch Verschiebung Rückkühlbetrieb in Nachtstunden
7	Kühlung tagsüber über KKM auf maximal 26°C (bzw. gleitend mit Außentemperatur)	Regeneration (überwiegend) nachts über KKM auf maximal 26°C (bzw. gleitend mit Außentemperatur)

Literatur

VDI 2164:2015-02 PCM-Energiespeichersysteme in der Gebäudetechnik (Entwurf)

DIN EN ISO 7730:2006-05 Ergonomie der thermischen Umgebung; Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730: 2005 (Ergonomics of the thermal environment; Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria (ISO 7730:2005); German version EN ISO 7730:2005). Berlin: Beuth Verlag

DIN EN 15251:2012-12 Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden; Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007 (Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics; German version EN 15251:2007). Berlin: Beuth Verlag

VDI 3525:2007-01 Regelung und Steuerung Raumluftechnischer Anlagen; Beispiele (Automation and control of air-conditioning systems; Examples). Berlin: Beuth Verlag

VDI 6034:2011-02 Raumkühlflächen; Planung, Bau und Betrieb (Cooling surfaces for rooms; Planning, installation and operation). Berlin: Beuth Verlag

7.3 Dezentrale PCM-Lüftungssysteme

Unter dezentralen PCM-Lüftungssystemen werden hier Systeme verstanden, bei denen das PCM als Speicher in ein dezentrales Lüftungstechnisches Gerät eingebracht ist. Die Kühlung der Raum- oder Frischluft kann dabei im Umluft- oder Frischluftbetrieb erfolgen. Die Regeneration des PCM erfolgt z.B. über Durchströmung mit kühler Nachtluft. Das Lüftungssystem kann optional mit einem Anschluss zur aktiven Durchströmung mit einem Kältefluid (z.B. Wasser) ausgestattet sein. Die aktive Durchströmung kann dabei in zwei Fällen eingesetzt werden:

- Im Kühlfall zu Spitzenlastzeiten, wenn die passive Kühlleistung des PCM nicht mehr ausreichend ist.
- Zur Regeneration des PCM (typischerweise nachts oder außerhalb der Nutzungszeiten).

Die Vorteile der aktiven Systeme gegenüber der rein passiven Ausführung sind:

- Größere Betriebssicherheit im Kühlfall durch Zuschaltmöglichkeit des aktiven Kühlkreises, wodurch eine höhere Kühlleistung erreicht werden kann.
- Bessere Regenerationsmöglichkeit des PCM.

Die Regeneration erfolgt dabei idealerweise zu Zeiten, in denen die Kälte effizient erzeugt und bereitgestellt werden kann, z.B. nachts bei geringeren Außenlufttemperaturen.

Um die PCM-Lüftungssysteme sinnvoll und energieeffizient betreiben zu können sollten nachfolgende Punkte zur Regelung beachtet werden. Hierbei muss im Kühlfall zwischen Sekundärluftbetrieb (Umluftbetrieb), Außenluftbetrieb und Mischbetrieb unterschieden werden:

- Sekundärluftbetrieb (Umluftbetrieb): Reiner Sekundärluftbetrieb findet dann statt, wenn keine Frischluft im Raum benötigt wird oder diese aus anderen Quellen (z.B. geöffnete Fenster) dem Raum zugeführt wird und die Raumlufthtemperatur > PCM-Temperatur ist. Die nötige Temperatur-

differenz für einen sinnvollen Betrieb hängt dabei vom verwendeten System ab. Die Kühlleistung wird neben der Temperaturdifferenz vom Volumenstrom bestimmt der regelbar sein sollte.

- Außenluftbetrieb: Reiner Außenluftbetrieb findet dann statt, wenn Frischluft im Raum benötigt wird und die Außenlufttemperatur $>$ PCM-Temperatur ist. Hierbei ergibt sich der Volumenstrom aus dem Frischluftbedarf und die Kühlleistung stellt sich entsprechend ein.
- Mischbetrieb: Mischbetrieb (kombinierter Sekundär- und Außenluftbetrieb) findet dann statt, wenn Frischluft im Raum benötigt wird und die Kühlleistung des reinen Außenluftbetriebes zu gering ist. In diesem Fall wird der Volumenstrom über einen Umluftanteil erhöht was die
- Kühlleistung bei noch aktivem PCM steigert. Hierbei ist die Raumlufttemperatur $>$ PCM-Temperatur.
- Die Kühlgrenztemperatur, ab der die aktive Kühlung zugeschaltet wird, sollte deutlich über der Schmelztemperatur des PCM liegen, um eine passive Kühlwirkung des PCM überhaupt erst zu ermöglichen. Grundsätzlich gilt, je höher die Differenz zwischen Kühlgrenztemperatur und PCM-Schmelztemperatur, desto höher ist die nutzbare passive Kühlleistung des PCM. Wir empfehlen die Kühlgrenztemperatur mindestens 4K höher anzusetzen als die Schmelztemperatur des PCM.
- Die vollständige Regeneration des PCM muss nach erfolgter Aktivierung (auch bei nur teilweisem Aufschmelzen) wieder sichergestellt werden. Dies geschieht entweder durch nächtliche Regeneration mit kühler Außenluft (»passiv« nur über Ventilator) oder durch aktive Regeneration über das Kühlfluid (aktiv). Die vollständige Regeneration des PCM sollte durch eine sinnvolle Regelgröße mit Abschaltkriterium (z.B. Rücklauf-/Luftaustrittstemperatur $<$ Erstarrungstemperatur; jedoch Unterkühlung berücksichtigen!) sichergestellt werden.
- Die nächtliche Regeneration des PCM sollte so energieeffizient wie möglich erfolgen, dies hängt vom Kälteerzeugungssystem bei aktiven Systemen bzw. von den nächtlichen Außenlufttemperaturen bei passiven Systemen ab. Bei rein »passiver« Regeneration mit kühler Außenluft sollte auf möglichst geringe Ventilatorlaufzeiten geachtet werden. Bei aktiver Regeneration kann es sinnvoll sein, längere Laufzeiten in Kauf zu nehmen, wenn dadurch die Kälteerzeugung des Kühlfluids effizienter erfolgen kann.
- Um die Kühllasten möglichst gering zu halten sollten die Fenster nur dann geöffnet sein, wenn die Außenluft kühler ist als die Raumluft. Auch der Sonnenschutz sollte sinnvoll nachgeregelt werden um den Solarenergieeintrag möglichst gering zu halten.

Hinsichtlich der Kombination der PCM-Lüftungssysteme mit zusätzlichen Kältebereitstellungssystemen sind wiederum verschiedenen Varianten möglich. Das Gleiche gilt für die Art der Regeneration der PCM-Materialien, die entweder z.B. über eine nächtliche Durchspülung mit Außenluft, alternativ aber auch z.B. über Grundwasser oder Rückkühlwerke erfolgen kann. Eine Darstellung möglicher Umsetzungsvarianten verdeutlicht nachfolgende Tabelle.

Tabelle 9: Mögliche Kältebereitstellungskonzepte bei PCM in Baustoffen.

PCM in Lüftungsanlagen		
Variante	Beschreibung	
	System ohne PCM	System mit PCM
1	Keine Kühltechnik	
2	Kühlung über KKM auf maximal 26°C (bzw. gleitend mit Außentemperatur)	
3	Kühlung über Grundwasser ganztags	
4	Kühlung über KKM auf maximal 26°C (bzw. gleitend mit Außentemperatur)	Kühlung über maschinelle PCM-Lüftung
5	Kühlung über KKM auf maximal 26°C (bzw. gleitend mit Außentemperatur)	Nutzung von Rückkühlwerken nachts zur Regeneration des PCM-Systems
6	Kühlung über KKM auf maximal 26°C (bzw. gleitend mit Außentemperatur)	Nutzung von Grundwasser ganztags zur Regeneration des PCM-Systems
7	Kühlung über KKM auf maximal 26°C (bzw. gleitend mit Außentemperatur)	Nutzung von Grundwasser nachts zur Regeneration des PCM-Systems

Literatur

VDI 2164:2015-02 PCM-Energiespeichersysteme in der Gebäudetechnik (Entwurf)

VDI 6035:2009-09 Raumlüftungstechnik; Dezentrale Lüftungsgeräte; Fassadenlüftungsgeräte (VDI-Lüftungsregeln) (Ventilation and air-conditioning technology; Decentralized ventilation systems; Wall-mounted air-conditioners (VDI ventilation code of practice)). Berlin: Beuth Verlag

VDMA 24390:2007-03 Dezentrale Lüftungsgeräte; Güte- und Prüfrichtlinie. Berlin: Beuth Verlag

7.4 Einschätzung hinsichtlich der positiven Eigenschaften der drei betrachteten PCM-Systeme

Die Wirksamkeit der einzelnen PCM-Systeme ist je nach Betriebsweise und Systemaufbau sehr unterschiedlich und muss bilanziell auf verschiedenen Ebenen betrachtet werden. Wichtig ist in diesem Zusammenhang die Festlegung geeigneter Referenzsysteme, gegenüber denen die Verbesserungen bewertet werden

können. Qualitativ werden im Folgenden verschiedene Möglichkeiten und deren Auswirkungen beschrieben:

- Falls sowohl in dem PCM-System als auch im gewählten Referenzsystem auf eine aktive Kältebereitstellung verzichtet wird, ergeben sich durch den Einsatz von PCM systembedingt lediglich Verbesserungen im thermischen Komfort, Einsparungen bei Nutzkälte, Endenergie oder Primärenergie treten nicht auf.
- Kann dagegen beispielsweise durch den Einsatz von PCM auf eine Kältemaschine zur Raumkonditionierung verzichtet werden, ist eine deutliche Verringerung des Endenergie- und Primärenergiebedarfs möglich, allerdings kann es in einem solchen Fall sogar zu einer Verschlechterung des thermischen Komforts kommen.
- Wird durch den Einsatz von PCM der Betrieb einer Kältemaschine in die Nachtstunden verschoben, führt dies unter Umständen zu einer Erhöhung der Nutzkältebereitstellung (möglicherweise auch zu einer Verschlechterung des thermischen Komforts), durch den verbesserten Wirkungsgrad der Kältemaschine nachts aufgrund niedrigerer Außentemperaturen aber zu einer Verringerung des Endenergie- und Primärenergiebedarfs.
- Wird es durch den Einsatz von PCM möglich, alternative Kältequellen (z.B. Grundwasser, Rückkühlwerke, Erdreichkühlung) einzusetzen, führt dies möglicherweise wiederum zu einer Erhöhung der Nutzkältebereitstellung, je nach System auch zu einer Erhöhung des Hilfsenergiebedarfs, insbesondere aber zu einer Verringerung des End- und Primärenergiebedarfs.

Hinsichtlich der Berücksichtigung der Wirksamkeit von PCM-Systemen in den normativen Verfahren der DIN V 18599 und DIN 4108-2 muss auf diese Variationen eingegangen werden. Durch beispielsweise den Ansatz der DIN V 18599, ausgehend von der Nutzwärme- und Nutzkältebetrachtung die End- und Primärenergie zu bilanzieren, muss eine detaillierte Unterscheidung der verschiedenen Systemansätze erfolgen. Dies bedingt eventuell auch eine Beschränkung der in den normativen Verfahren abbildbaren Systemansätze.

8 Simulationsmodelle

8.1 PCM - Baustoffe (esp-r)

Die Simulation der PCM-haltigen Baustoffe erfolgte mit dem Simulationsprogramm esp-r der Strathclyde University of Glasgow. Das Simulationsprogramm ist open source und verfügt bereits über die integrierten PCM Modelle von Schossig [8] und Heim [9]. Die Integration des PCM erfolgt dabei als "Special Material File" welches auf definierte Schichten des Wandaufbaus zusätzliche temperaturabhängige Wärmekapazitäten aufprägt. Beim PCM-Modell von Schossig wird eine detailliertere Temperaturlösung der Wärmekapazitäten eingesetzt, wohingegen das PCM Modell von Heim eine einfache Rechteckfunktion zur Beschreibung der Wärmekapazität einsetzt. In den hier durchgeführten Simulationen wurde das Modell von Heim angewendet, um die große Anzahl der variierten Parameter zeitlich rechnen zu können.

Die PCM Menge wurde dabei so variiert, dass bezogen auf die Raumgrundfläche zum einen unabhängig von der Belegung von Wand und Decke die gleiche Wärmespeicherkapazität erreicht wird (bessere Aktivierbarkeit) und zum anderen die Wärmespeicherkapazität des Comfortboards auf Wand und/oder Decke aufgebracht wird, wodurch variable Gesamtraumwärmespeicherkapazitäten in Abhängigkeit von der belegbaren Flächen erreicht werden.

8.1.1 Fallunterscheidung

Abhängig von der Raumgeometrie wurde jeweils ein einzoniges Gebäudemodell aufgebaut. Variiert wurden dabei in den Gebäudemodellen jeweils die folgenden Randbedingungen:

- Eckraum
- Zentralraum
- Fenstergrößen F30, F50, F70 und F100

Weitere Parametervariationen, wie in den Randbedingungen beschrieben, wurden dann innerhalb des jeweiligen Gebäudemodells vorgenommen. Hierzu wurden Steuerskripte eingesetzt, die beim Rechnen der Simulationen die jeweils notwendigen Konfigurationsdateien einlesen. Konfigurationsdateien wurden für die in Tabelle 10 aufgeführten Parameter erstellt.

Tabelle 10: Parametervariationen innerhalb der Konfigurationsdateien.

Konfigurationsparameter	Kommentar
Climate	Klimadatensatz für Potsdam, Rostock oder Mannheim gemäß Testreferenzjahr
Construction	Auswahl des Wandaufbaus entsprechend der leichten oder schweren Konstruktion kombiniert jeweils mit dem Aufbau gemäß EnEV 16 und EnEV 09
Shading	Parametrierung der Fenster abhängig von der Verschattung, sowie Bedingungen unter denen automatisch oder manuell Verschattet wird
Material	Materialdaten der Wandaufbauten gemäß Definitionen der Randbedingungen
Operation	Zeitlicher Verlauf der Fensterlüftung
Special Material File	Anpassung der temperaturabhängigen Wärmespeicherfähigkeit durch das PCM, jeweils abhängig von der PCM Menge verteilt auf die nutzbaren Flächen auf Decke und/oder Wände

8.2 PCM - Kühldecke (TRNSYS)

Die dynamische Betrachtung der Variante PCM-Kühldecke wurde mit dem Simulationsprogramm TRNSYS abgebildet. Die Integration der Kühldecke erfolgte hier durch ein externes Modul (Type), welches im Energieaustausch mit dem Raum steht.

8.2.1 Grundidee Fallunterscheidung

Für die dynamischen Untersuchungen wurden, wie in den Randbedingungen beschrieben, jeweils ein Eck- und ein Zentralraum betrachtet. Das Gebäudemodell wurde daher mehrzonig abgebildet. Eine einzelne Zone bildet dabei unterschiedliche Variationen/Szenarien eines Zentral- und eines Eckraums ab, deren Ergebnisse direkt verglichen werden können. Innerhalb einer Raumsituation sind dies:

- Grundfall mit PCM (Kühldecke)
- Referenzfall ohne PCM

- Variante mit PCM aber inaktiver Kühldecke (Grenzbetrachtung zur Plausibilitätskontrolle).
- Bestimmung der Kühlleistung (konstant z.B. 25°C, ideale Kühlung)

Nachfolgende Abbildung zeigt die Simulationsoberfläche in TRNSYS, in der „TYPE 56“ das mehrzonig umgesetzte Gebäudemodell darstellt und „PCM-Type 399“ modelliert die Kühldecke. Alle anderen dargestellten Komponenten repräsentieren Steuerungsmodule sowie Ein- und Ausgaben.

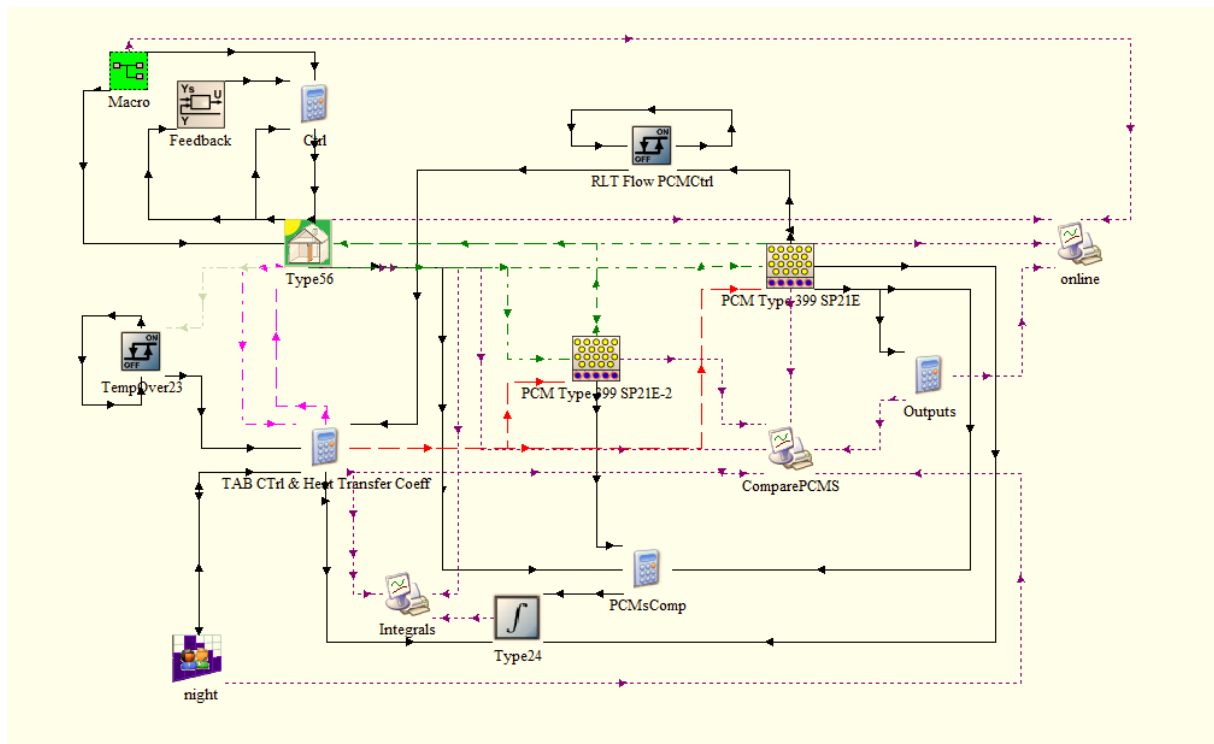


Bild 5: Simulationsmodell Kühldecke TRNSYS.

8.2.2 Basismodell, Variantenbildung und globale Variablen

In einem Basismodell sind alle vorgesehenen Varianten (Komponenten, Regelungen usw.) enthalten und werden über Steuergrößen an-, ab- oder umgeschaltet. Die Steuerung der verschiedenen Variationen - z.B. unterschiedliche PCM-Eigenschaften oder Regelstrategien - erfolgt im Wesentlichen über globale Variablen (Control Card in TRNSYS). Diesbezüglich verdeutlicht Tabelle 11 die Art der verwendeten Parameter sowie deren Default-Werte.

Tabelle 11: Control Card (globale Variablen in TRNSYS).

Control Card	Kommentar
Mflow=300	Liter/h, Massenstrom, Richtwert, aus Randbedingungen der Validierung übernommen, Betriebsweise (z.B. Tag/Nacht) über Steuergrößen
CoolingTech=1	Art der Kühlung: 0=Chiller, 1=WetCoolingTower, 2=DryCoolingTower; 3=Geothermal Water
GeothermalTemp=12	Vorlauftemperatur (vordefiniert)
People=1.5	Büronutzung, Anpassung je nach Vorgaben Nutzungsprofil
DryCtrlvsOperCtrl=1	Umschalter: legt fest ob operative (1) oder Lufttemperatur (0) als Bezug verwendet wird. Bevorzugt = 1.
NightFlow=1	Multiplikator für den Massenstrom (von 300 l, siehe Mflow oben) für die Zeit von 22:00 bis 6:00 Uhr
DayFlow=2	Multiplikator für den Massenstrom (von 300 l, siehe Mflow oben) für die Zeit von 8:00 bis 18:00 Uhr
TempOverXXSup = 23	°C Maximale Grenztemperatur, Anpassung z.B. für DIN 4108-2, d.h. 25, 26 oder 27°C
TempOverXXInf = 22.5	°C Minimal Grenztemperatur
StrahlungXXXSup = 900	kJh/m ² Maximale Grenzstrahlung außen Sonnenschutz, Anpassung an Vorgaben DIN 4108-2
StrahlungXXXMin = 360	kJh/m ² Minimal Grenzstrahlung außen Sonnenschutz, Anpassung an Vorgaben DIN 4108-2
ASSIGN "Input\cpComfortboard23_cool.dat" 112	Zuweisung Datendatei Eigenschaften PCM-Material Kühlfall
ASSIGN "Input\cpComfortboard23_heat.dat" 114	Zuweisung Datendatei Eigenschaften PCM-Material Heizfall

Im Rahmen der Validierung wurden drei verschiedene Systeme für die Kühldecke betrachtet, d.h. Thermoboard 23, Comfortboard 23 und Smartboard 23. Das Thermoboard 23 ist ein klassisches Kühldeckensystem mit einer integrierten Gipskartonplatte als Übergabefläche, Comfortboard 23 und Smartboard 23 haben jeweils PCM in der Gipskartonplatte integriert.

Die Validierung des Simulationsmodells erfolgte anhand der Modellierung der Bedingungen einiger vorliegender Laborprüfungen. Den Aufbau des Testraums zeigt Bild 6.

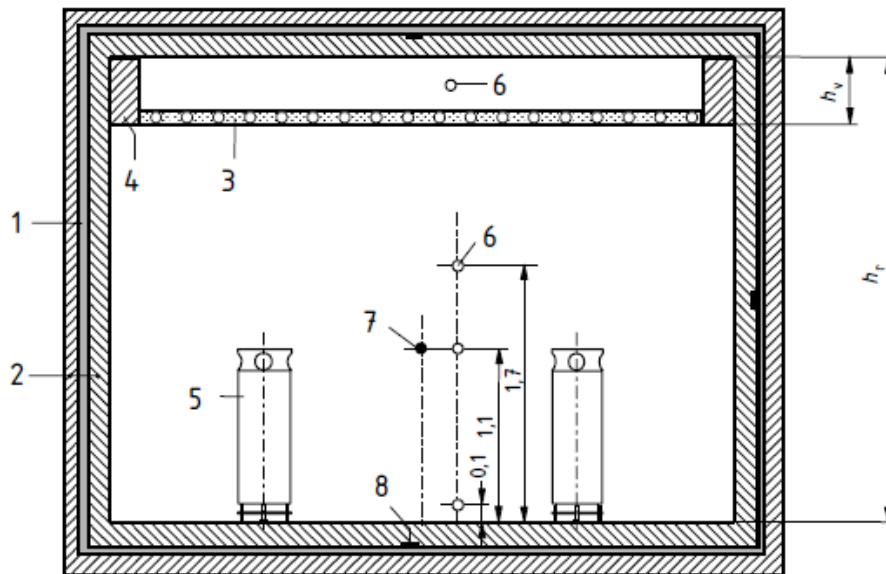


Bild 6: Testraum zur Vermessung einer PCM-Kühldecke in Anlehnung an die DIN EN 14240.

Im Rahmen der weiteren Validierung der Gebäudemodelle wurde ein Feedback-Controller eingesetzt, über den die Temperatur im Referenzraum geregelt wird. Hierfür wurde die dynamisch ermittelte Temperatur des PCM-Raums als Steuergröße für den Referenzraum verwendet, so dass eine Bewertung der über die Kühldecke in den Raum eingebrachten Kälteleistung möglich ist.

8.2.3 Systemregelung

Raumseitig erfolgte die Regelung der PCM-Kühldecke entsprechend des Anwendungsfalls eines während der Nutzungszeit passiven agierenden Bauteils. Dies bedeutet, dass eine Regeneration der Kühldecke außerhalb der Nutzungszeit mit den jeweilig zur Verfügung stehenden Kaltwassertemperaturen und einem festen Durchfluss erfolgt. Im Modell erfolgte eine Überwachung dahingehend, dass die Regeneration gestoppt wurde, sobald das PCM-Material vollständig erstarrt war. Hierdurch wurde eine zusätzliche Unterkühlung des Raums verhindert. Parallel erfolgte ebenfalls eine Überwachung der Raumtemperatur dahingehend, dass eine Unterschreitung des Komfortbereichs aufgrund des Betriebs der Kühldecke ausgeschlossen wurde. Die Festlegung der dynamisch verwendeten Vorlauftemperatur zur Kühldecke verdeutlicht Tabelle 12.

Tabelle 12: Festlegung der in der Simulation verwendeten Vorlauftemperaturen für die Regeneration der PCM-Kühldecke

SendTemp =	$\begin{aligned} & \text{eql}(\text{CoolingTech},0)*7 \\ & + \text{eql}(\text{CoolingTech},1)*(\text{WetBulb}+5) \\ & + \text{eql}(\text{CoolingTech},2)*(\text{DryAmb}+5) \\ & + \text{eql}(\text{CoolingTech},3)*12 \end{aligned}$		(9)
mit			
DryAmb	Außentemperatur (trocken)	Aus den Klimadaten	
WetBulb	Feuchtkugeltemperatur außen	Aus den Klimadaten	
CoolingTech=0	Kältemaschine elektrisch	$T_{VL}=7$	
CoolingTech=1	Trockenkühlturm	$T_{VL}=\text{DryAmb}+5\text{K}$	
CoolingTech=2	Nasskühlturm	$T_{VL}=\text{WetBulb}+5\text{K}$	
CoolingTech=3	Grund-/Brunnenwasser	$T_{VL}=12^\circ\text{C}$	

8.3 Lüftungsanlage

8.3.1 Untersuchtes Lüftungssystem

Ein weiterer möglicher Einsatzbereich von PCM ist der Einsatz in einer Lüftungsanlage. Als Grundlage für das hier untersuchte PCM-Lüftungs-Konzept dient das bei der Validierung des PCM-Lüftungsspeicher-Modells herangezogene Gebäude des Amts- und Landgerichts Düsseldorf [10]. Um die Skalierbarkeit dieser Untersuchungen auf andere Gebäude sicher zu stellen, wird das System auf die in Abschnitt 6 festgelegten Räume angewendet. Bei dem untersuchten System wird das PCM in den Zuluftstrang integriert. Die integrierte PCM-Menge wird, in Anlehnung an ein am Fraunhofer InHaus2 untersuchtes System [11], zu 42 kg pro Meter Fassadenbreite festgelegt. Zusätzlich wird mit 21 kg/m die halbierte PCM-Menge untersucht. Die resultierenden PCM-Mengen sind in Tabelle 13 zusammengestellt. Auf Grund der unterschiedlichen Außenlufttemperaturen liegen dem Sommer und dem Winter-Betrieb unterschiedliche Betriebs-Konzepte zu Grunde. Als Referenz dient jeweils ein identisches Gebäude allerdings mit einem Lüftungssystem ohne PCM-Speicher. Die energetischen bzw. raumklimatischen Einflüsse des PCMs in der Lüftung können durch den Vergleich mit der PCM-freien Referenz errechnet werden. Da die Bewertung der Einflüsse des PCMs auf Raumniveau geschieht werden die Räume mit einer idealen Heizung bzw. Kühlung ausgestattet, die das Konzept des Nutzenergiebedarfs am besten wiedergeben. Bei der Lüftungsanlage handelt es sich um eine druckneutrale Lüftungsanlage mit Zu- und Abluft die über eine Wärmerückgewinnung mit einem Rückgewinnungsgrad von 80 % verfügt. Die Lüftungsanlage wird jeweils so ausgelegt, dass der hygienische Mindestluftwechsel der jeweiligen Nutzung erreicht wird. Folglich wird auch der PCM-Speicher, bei allen Betriebsweisen, mit eben diesem Luftwechsel durchströmt. Bei der Schul- und der Büronutzung wird zwischen Nutzungs- und Abwesenheitszeiten unterschieden. für die Wohnnutzung wird sowohl nach DIN V 18599-10 als auch nach DIN 4108-2 eine permanente Nutzung von 24 h pro Tag, mit einem entsprechenden Betrieb der Lüftungsanlage, angesetzt. Die Klassifizierung des hier

betrachteten Lüftungssystems nach DIN V 18599-3, Anhang A, Tabelle A1 entspricht, je nach Rückwärmzahl, den Nummern 2-4, wobei der PCM-Speicher den Platz des Heiz- und des Kühlregisters übernimmt.

Sommerbetrieb

Im Sommerbetrieb werden durch den in die Zuluft integrierten PCM-Speicher die hohen mittäglichen Spitzen der Außenlufttemperaturen vor dem Eindringen in den Raum durch das PCM geglättet. Die gespeicherte Wärme wird nachts durch die kühlen Außenlufttemperaturen wieder aus dem PCM entladen. Hierfür wird die Lüftung auch außerhalb der Nutzungszeiten betrieben, allerdings unter Nutzung eines Bypasses der den Raum umgeht. Dies verhindert, dass der Raum nachts, anstatt auszukühlen, mit der warmen Entladungs-Luft aus dem PCM-Speicher erwärmt wird. Während dieser Regenerierungs-Phasen wird derselbe Luftwechsel im PCM-Speicher angesetzt, wie während der Nutzungszeiten. Um die relativ großen PCM-Mengen an den Raum thermisch anzukoppeln wird, zusätzlich zum hygienischen Mindestluftwechsel, ein Umluftanteil gefahren der sich, wie auch die PCM-Menge, an dem InHaus2-System [11] orientiert. Hierbei wird eine Umluftmenge von 51 m^3 pro Meter Fassadenlänge angesetzt. Es resultieren die Umluftmengen in Tabelle 13. Dieses Sommer-Betriebskonzept ist in Bild 7 und Tabelle 14 dargestellt. Auf Grund des Umluft-Systems ist zwingend eine intelligente Regelung der Abluft erforderlich. Aus diesem Grund wird die Deaktivierung des Sommer-Bypasses immer dann genutzt wenn es energetisch sinnvoll ist. Dies ist dann der Fall wenn die Raumluft (T_{Raum}) kühler als die Außenluft (T_{Ext}) ist. Der Umluftanteil wird nur dann angesetzt wenn die Raumlufttemperatur nicht im Bereich ihres Minimalwerts ist. Die Gesamtzuluftmenge des Raum setzt sich aus der Summe der Umluft- und der Frischluftmenge zusammen. Um die Lüfter Laufzeiten und damit den elektrischen Hilfsenergiebedarf zu reduzieren, wird der Luftstrom zur Entladung des PCM-Speichers nur dann zur Verfügung gestellt wenn einerseits die Außen- bzw. Frischlufttemperatur (T_{ext}) niedriger ist als die Temperatur der PCM-Speichers (T_{PCM}) und andererseits das PCM noch mit Wärme beladen ist ($T_{\text{PCM}} > T_{\text{PCM,Grenz}}$, siehe Tabelle 18). Um für die Wohnnutzung mit 24-stündiger Nutzungszeit eine Entladung des PCMs zu ermöglichen wird der normale Umluftbetrieb bzw. Lüftungsbetrieb von 23:00 bis 6:00 Uhr deaktiviert. In dieser Regenerationszeit wird mit dem Zuluftventilator die hohe Umluft-Lüftungsrate gefahren, die warme Luft aus dem PCM-Speicher wird über den Sommerbypass abgeführt. Den Frischluftwechsel im Raum übernimmt während dieser nächtlichen Regenerationszeit der Abluftventilator der die Abluft ebenfalls über den/einen Sommerbypass aus dem Gebäude leitet.

Raumtyp	PCM-Menge		Umluftmenge (Sommer- betrieb) [m³/h]	Fassadenbreite [m]
	Voll [kg]	Halb [kg]		
Zentralraum	150	75	180	3,6
Eckraum	230	115	280	5,5*
Doppelraum	300	150	360	7,2

Sommer-Betrieb

ACR Infiltration
Ggf. Tag- / Nachtlüftung

Ideale Heizung / Kühlung

PCM-Speicher

WRG

$T_{\text{ext}} < T_{\text{PCM}}$
&
 $T_{\text{PCM}} > T_{\text{PCM,Grenz}}$

20 % / 100 %

20 %

80 %

Nutzungszeit (24 h bei Wohnnutzung)

Abwesenheit

$T_{\text{raum}} < T_{\text{ext}}$
&
 $T_{\text{raum}} > T_{\text{ext}}$

T_{ext}

44 | 178

Tabelle 14: Übersicht über die Lüftungsraten des modellierten PCM-Lüftungssystems im Sommerbetrieb.

Sommer-Betrieb - <u>PCM</u>					
	Raum			Lüftungsgerät (PCM)	
	Volumenstrom	Zulufttemperatur	Fenster	Volumenstrom	Zulufttemperatur
Nutzungszeit	Frisch- und Um-luft <i>Falls Heizbetrieb</i> Frischlufte	PCM	Infiltration	Frisch- und Um-luft	Außen <i>Falls:</i> $T_{Raum} < T_{Ext}$ WRG
Nutzungszeit - Taglüftung ¹	Frisch- und Um-luft <i>Falls Heizbetrieb</i> Frischlufte	PCM	Infiltration <i>Falls:</i> $T_{Raum} > T_{Grenz}$ & $T_{Raum} > T_{Ext}$ 3 1/h / 5 1/h	Frisch- und Um-luft	Außen <i>Falls:</i> $T_{Raum} < T_{Ext}$ WRG
Abwesenheit	aus	-	Infiltration	$ACR_{Regenerierung}^2$ <i>Falls:</i> <i>PCM-entladen</i> <i>oder $T_{Ext} > T_{PCM}$</i> aus	Außen
Abwesenheit - Nachtlüftung ¹	aus	-	2 1/h	$ACR_{Regenerierung}^2$ <i>Falls:</i> <i>PCM-entladen</i> <i>oder $T_{Ext} > T_{PCM}$</i> aus	Außen
WRG-Nutzung	intelligenter Sommer-Bypass				
Sommer-Betrieb - <u>Referenz</u>					
	Raum				
	Volumenstrom	Zulufttemperatur	Fenster		
Nutzungszeit	Frischlufte	Außen <i>Falls:</i> $T_{Raum} < T_{Ext}$ WRG	Infiltration	-	
Nutzungszeit - Taglüftung ¹	Frischlufte	Außen <i>Falls:</i> $T_{Raum} < T_{Ext}$ WRG	Infiltration <i>Falls:</i> $T_{Raum} > T_{Grenz}$ & $T_{Raum} > T_{Ext}$ 3 1/h / 5 1/h		
Abwesenheit	aus	-	Infiltration		
Abwesenheit - Nachtlüftung ¹	aus	-	2 1/h		
WRG-Nutzung	intelligenter Sommer-Bypass				

¹ : Nur nach DIN 4108

² : ACR_{Regenerierung} entspricht kombinierter Luftmenge aus Frisch- und Umluft

Winterbetrieb

Im Winterbetrieb wird das PCM mit Solarstrahlungs-bedingten Überwärmungen der Raumlufte beladen. Die Raumlufte wird, unabhängig davon ob sie überwärmt ist, als Ablufte abgesaugt. Wenn die Ablufte warm genug ist, wird die Zuluft des Raums die durch den PCM-Speicher strömt, auf Grund der Wärmerückgewinnung, wärmer sein als der Schmelzbereich des PCMs. Das PCM wird

somit aufgeschmolzen, allerdings ohne dass die Temperaturen in den überwärmten Räumen reduziert werden. Sobald sich allerdings die Raumlufttemperatur wieder reduziert, sinkt vor allem bei niedrigen Außenlufttemperatur auch die Zulufttemperatur nach der Wärmerückgewinnung, mit der der PCM-Speicher durchströmt wird. Hierdurch kristallisiert das PCM und die gespeicherte Wärme wird freigesetzt und mit der Zuluft in den Raum transportiert. Dieser Effekt ist hauptsächlich in den Übergangszeiten nutzbar wenn die Zuluft nach der Wärmerückgewinnung, auf Grund der moderaten Außenlufttemperaturen, hoch genug werden, um das PCM aufzuschmelzen. Dieses Winter-Betriebskonzept ist in *Bild 8* und Tabelle 15 dargestellt. Da die Verwendung des Umluftanteils im Winter kontraproduktiv ist, wird sie im Winterbetrieb nicht genutzt um den Hilfsenergieanteil nicht unnötig zu erhöhen. Für den EnEV 2009 Zentralraum mit Büronutzung, $f_c=0,5$, 50 % Fensterfläche und festem Sonnenschutz ergeben sich die Einsparungen nach Tabelle 16 in Abhängigkeit vom Umluftanteil.

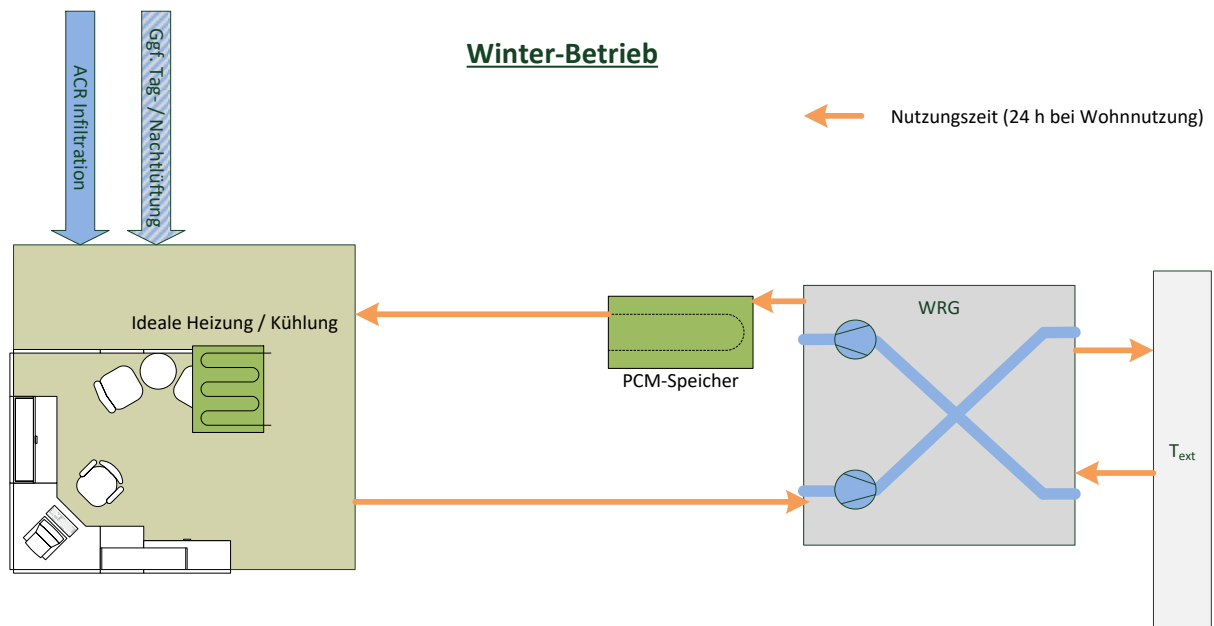


Bild 8: Betriebs-Konzept der PCM-Lüftung im Winter.

Tabelle 15: Übersicht über die Lüftungsraten des modellierten PCM-Lüftungssystems im Winterbetrieb.

Winter-Betrieb (PCM und Referenz)					
	Raum			Lüftungsgerät (PCM)	
	Volumenstrom	Zulufttemperatur	Fenster	Volumenstrom	Zulufttemperatur
Nutzungszeit	an	PCM	Infiltration	an	WRG
Abwesenheit	aus	-	Infiltration	aus	-
WRG-Nutzung	Ja (Rückwärmezahl 80 %)				

Tabelle 16: Beispielhafte Einsparungen im Winterbetrieb

Modus- Winterlüftung	Nutzwärmebedarf [kWh/a]	Einsparung
ohne PCM – ohne Umluft	472	-
mit PCM – ohne Umluft	456	4,3 %
mit PCM – mit Umluft	513	-8,7 %

8.3.2 Auswahl des PCMs

Im Rahmen dieser Untersuchungen werden die Phasenwechselbereiche der jeweiligen Anwendung angepasst. Für die Berechnungen nach DIN V 18599 werden die PCMs so gewählt, dass der Phasenwechselbereich des einen PCMs knapp oberhalb der Heizfall-Solltemperatur und der eines anderen knapp unterhalb der Kühlfall-Solltemperatur liegt. Für den Kühlfall wird das RT22HC von Rubitherm gewählt. Wie links in Bild 9 zu erkennen ist, schmilzt dieses Material bis zu einer Temperatur von 23 °C auf, so dass der Wärmespeicherungs-Prozess unterhalb der DIN V 18599 Soll-Raumlufttemperatur von 24 °C endet.

Für den Heizfall (nur DIN V 18599) wird das rechts in Bild 9 dargestellte RT21HC von Rubitherm gewählt. Dieses PCM-Produkt hat seinen Phasenwechselbereich um bzw. knapp unterhalb der Raumsolltemperaturen von 20 bzw. 21 °C. Dies entspricht dem Temperaturbereich, der in der Zuluft zu erwarten ist. Da in den Simulationen Winter und Sommer, also Heiz- und Kühlfall zusammen berechnet werden, werden beide DIN V 18599-Fälle mit jeweils beiden PCM-Typen (RT21HC und RT22HC) berechnet.

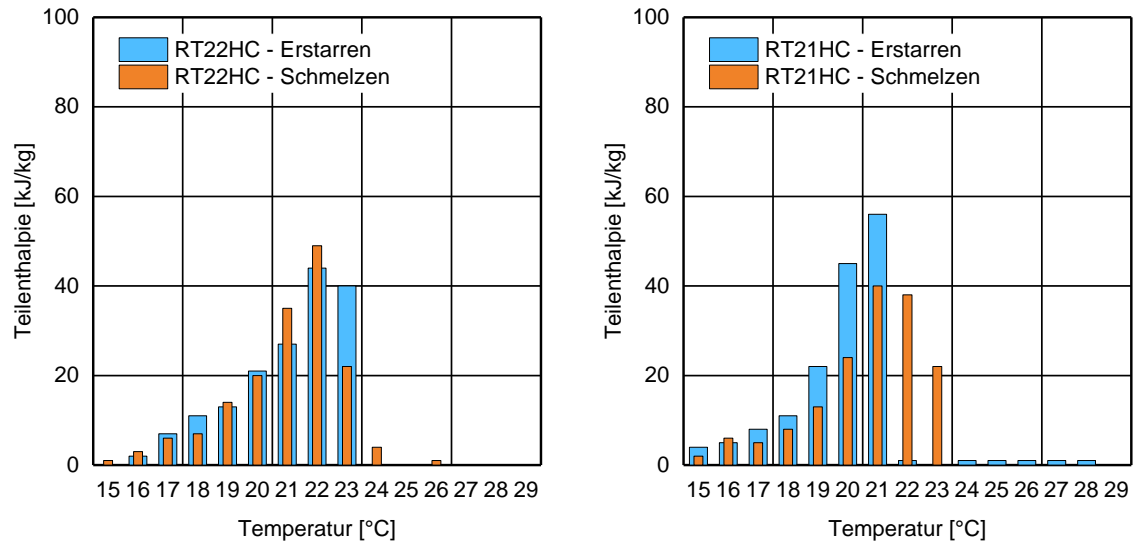


Bild 9: Teilenthalpien der Schmelz- und Erstarrungsprozesse der Rubitherm PCMs RT22HC (links) und RT21HC (rechts) für die DIN V 18599-Berechnungen.

Die maximalen Raumlufthtemperaturen nach DIN 4108 sind, mit 25 °C – 27 °C, für alle Klimazonen höher als die Kühlfall-Solltemperatur nach DIN V 18599. Die entsprechend gewählten Rubitherm PCM-Typen für die DIN 4108-Klimaregionen sind in Tabelle 17 dargestellt.

Tabelle 17: Teilenthalpien der Schmelz- und Erstarrungsprozesse der Rubitherm PCMs für die DIN 4108-Berechnungen.

Klima-Region	Grenz-Temperatur	PCM-Typ	Verteilung der Teilenthalpien
A	25 °C	RT24	
B	26 °C	RT25	
C	27 °C	RT26	

Tabelle 18: Grenztemperaturen für den Sommerbetrieb.

PCM-Typ	RT21HC	RT22HC	RT24	RT25	RT26
$T_{\text{PCM,Grenz}} [^{\circ}\text{C}]$	16	16	19	23	24

Die kalorimetrischen Ergebnisse der Teilenthalpien, die Produktdatenblättern der Fa. Rubitherm entnommen werden, weisen für den Schmelz- und Erstarungsprozess teilweise unterschiedliche Energie-Summen auf. Diese Differenzen betragen bis zu 15 % auf. Da dies nach dem Satz der Energieerhaltung nicht möglich ist, wird jeweils der höhere Summenwert dem niedrigeren durch Reduktion der Teilenthalpien in den warmen und kalten Randbereichen angepasst.

9 Ergebnisse

9.1 Variantenbezeichnungen in Tabellen und Diagrammen

Zur Vereinfachung der Lesbarkeit der nachfolgend aufgeführten Tabellen und Diagramm sind in Tabelle 19 die verwendeten Kurzbezeichnungen für Parameter und Varianten aufgeführt (z.T. deutsch und englisch).

Tabelle 19: Verwendete Kurzbezeichnungen für Parameter und Varianten.

Parameter kurz/engl.	Parameter dtsh.	Varianten kurz/engl.	Varianten dtsh.	Bemerkungen
SYS (ystem)	PCM-System	board ceiling vent (ventilati- on)	Bauplatte Kühldecke Lüftungssystem	
MOD (model)	Raummodell	central corner double	Zentralraum Eckraum Doppelraum	Raummodul 20 m ²
ORI (orientati- on)	Orientierung	s (south) e (east) n (north) w (west)	Süd Ost Nord West	
CLI (climate)	Klimaregion	a (Rostock) b (Potsdam) c (Mannheim)		Bezeichnungen früher: sommerkühl, gemäßigt, sommerheiß
ENVE (envelo- pe)	Gebäudehülle	09 (2009) 16 (2016)		Wärmeschutzniveau (U-/g- Werte) gemäß EnEV
CONST (construction)	Bauweise	light medium heavy	leicht mittel schwer	
WINA (window area)	Fensterflächen- anteil	30 50 70 100		in [%]
SUSHI (sun shield)	Sonnenschutz Steuerung	fix manu auto	feststehend manuell automatisch	
FC	Minderungsfak- tor Sonnen- schutz (Formel- zeichen F_c)	0 20 50 100		in [%]

UPROF (user profile)	Nutzungsprofil	resident office school	Wohnen Büro Schule	
VENT (ventilation)	Lüftung	win (window) exh (exhaust) supexh (supply/exhaust)	Fensterlüftung Abluftanlage Zu-/Abluftanlage	
ACHUSE (ACH ¹ use)	Tagluftwechsel	uprof 3		gem. Nutzungsprofil oder erhöht auf 3 h ⁻¹
ACHNOUSE (ACH ¹ no use)	Nachtluftwechsel	uprof 2 5		gem. Nutzungsprofil oder erhöht auf 2 h ⁻¹ bzw. hoch, d.h. 5 h ⁻¹
PROP (properties PCM)	Eigenschaften PCM	par23 par25 comf	Paraffin 22/23 Paraffin 24/25 comfort board	Erstarrungs-/Schmelzpunkt (Temperatur)
AMO (amount PCM)	Belegung PCM	1 2 3	siehe	
SURF (surface PCM)	Flächenbelegung	wall ceil (ceiling) both	Wand Decke beide	systemabhängig: nur Bauplatte
CTECH (cooling tech)	Kühltechnik	vent (ventilation) dryct (dry cooling tower) wetct (wet cooling tower) geotw (geothermal water) chill (chiller)	(Nacht-)Lüftung Trockenkühlturm Nasskühlturm Grundwasser Kältemaschine	systemabhängig: nur Kühldecke
BYP (bypass)	Bypass möglich	n (no) y (yes)	nein ja	systemabhängig: nur Lüftungssystem

¹⁾ ACH - air change per hour

In Tabelle 20 und Tabelle 21 sind die in den Simulationen der drei verschiedenen Systeme verwendeten Randbedingungen für die eingesetzten PCM-Materialien zusammengefasst.

Tabelle 20: Für die drei Systeme verwendete PCM-Mengen (AMO, Belegung).

System	Bauplatte		Kühldecke ³		Lüftungsanlage ^{2,4}		
PCM-Eigenschaften PROP ¹	Paraffin	Comfort-board	Paraffin 22/23	Paraffin 24/25	alle		
MOD	alle		alle		central	corner	double
Fassadenlänge (Hauptfassade)					3,6	5,5	7,2
Einheit	[kJ/m ²]	[kJ/m ²]	[kJ/m ² Grundfläche]	[kJ/m ² Grundfläche]	[kg]	[kg]	[kg]
Variante 1	300 ⁵		200	330	150	230	300
Variante 2		230 ⁶			75	115	150

¹⁾ PCM-Eigenschaften: Erstarrungs- und Schmelzpunkte [°C]

²⁾ PCM-Menge Lüftungsanlage
Größenordnung 42 kg/(m Fassade), in Anlehnung an eine abgeschlossenes Forschungsprojekt (InHaus2)

³⁾ Kühldecke: Eigenschaften und Menge in Anlehnung an Versuchsaufbau Validierung

⁴⁾ Variante 2 bei Lüftungsanlage: zusätzliche Betrachtung der halbierten PCM-Menge

⁵⁾ [kJ/m² Grundfläche]

Gesamtspeicherkapazität im Raum bezogen auf die Raumgrundfläche, daher spezifische Wärmespeicherkapazität auf Wand/Decke abhängig von der Größe belegter Fläche, nur latenter Anteil

⁶⁾ [kJ/m² Platte]

Wände und Decken belegt mit der Wärmespeicherkapazität des realen Comfortboard, dadurch skaliert die Gesamtspeicherkapazität im Raum mit der Anzahl belegter m² auf Wand und Decke, nur latenter Anteil

Tabelle 21: Für die drei Systeme verwendete PCM-Eigenschaften (PROP).

System	Bauplatte ²	Kühldecke	Lüftungsanlage ³	
betrachtetes Berechnungsverfahren	alle	alle	DIN V 18599	DIN 4108-2
Variationen	Paraffin 22/23	Paraffin 22/23	Paraffin 21/22	Paraffin 24/25
	Paraffin 24/25	Paraffin 24/25	Paraffin 22/23	Paraffin 25/26
	Comfortboard 22/23			Paraffin 26/27

¹⁾ PCM-Eigenschaften: Erstarrungs- und Schmelzpunkte [°C]

²⁾ Bauplatte: Breite Schmelzbereich = 2 K, andere Systeme 4 K

Bei "Paraffin" wird im Modell eine virtuelle Platte abgebildet. Bei der Variante "Comfortboard" kommt auch Paraffin zum Einsatz, allerdings werden reale Daten der Enthalpie (Menge PCM) von 21,2 kJ/kg auf real belegte Flächen im simulierten Raum aufgeprägt, daher ist bei Nutzung von Wand und Decke eine höhere Belegung und damit eine höhere Gesamt-Wärmekapazität im Raum möglich.

³⁾ Lüftungsanlage: bei der Wahl der Eigenschaften wird der jeweils optimale Fall abgebildet, daher kommen Fallweise (Norm, Klima) unterschiedliche Eigenschaften zum Einsatz.

Bei den Berechnungen für den sommerliche Wärmeschutz (DIN 4108-2) sind die optimalen Eigenschaften abhängig von der Klimaregion und damit vom Bezugswert der Raumtemperatur, d.h.

Klimaregion A (25°C): Paraffin 24/25

Klimaregion B (26°C): Paraffin 25/26

Klimaregion C (27°C): Paraffin 26/27

9.2 Auswertung der Simulationsrechnungen - Methode

Bei der hier dargestellten Beschreibung der für die Auswertungen verwendeten Methode sind im Einzelfall nicht alle Parameter aufgeführt und es erfolgt an dieser Stelle keine Interpretation der Ergebnisse. Siehe dazu die anschließenden Abschnitte.

9.2.1 Sommerlicher Wärmeschutz DIN 4108-2

Bei den Simulationen zum sommerlichen Wärmeschutz wird die Anforderungsgröße Übertemperaturgradstunden Gh_x [Kh/a] ausgewertet. Die Grenztemperatur für die Bestimmung der Übertemperaturen (Bezugswert der operativen Raumtemperatur $\theta_{b,op}$) ist dabei abhängig von der Klimaregion, daher erhält das Formelzeichen Gh den Index x stellvertretend für die verschiedenen Temperaturen, d.h.

- Klimaregion A (Rostock): $\theta_{b,op} = 25^\circ\text{C}$, $Gh_x = Gh_{25}$ [Kh/a]
- Klimaregion B (Potsdam): $\theta_{b,op} = 26^\circ\text{C}$, $Gh_x = Gh_{26}$ [Kh/a]
- Klimaregion C (Mannheim): $\theta_{b,op} = 27^\circ\text{C}$, $Gh_x = Gh_{27}$ [Kh/a]

In Abhängigkeit von der Nutzungsart wird die übliche Anwesenheitszeit (Wohnnutzung 24 h/d; Nichtwohnnutzung Montag bis Freitag 7 Uhr bis 18 Uhr) als Bezugszeit für den zu bestimmenden Wert der Übertemperaturgradstunden zugrunde gelegt.

Die folgende Abbildung zeigt den gewählten Ansatz für die graphische Auswertung der Simulationsergebnisse. Anhand dieses Beispiels soll zunächst die Darstellung erläutert werden.

Aufgetragen sind hier auf der Primärachse links die **Übertemperaturgradstunden** bezogen auf die Grenztemperaturen der jeweiligen Klimaregionen. Auf der Abszisse ist der Abminderungsfaktor für **Sonnenschutz** F_c , welcher zwischen $F_c = 0$ (Grenzbetrachtung, kein Strahlungsdurchgang) und $F_c = 1$ (kein Sonnenschutz). Die Berechnungen erfolgten für $F_c = 0,2$ (guter außenliegender Sonnenschutz), $F_c = 0,5$ (einfacher außenliegender Sonnenschutz, z.B. Vordach) und $F_c = 0,7$ (mittlerer innenliegender Sonnenschutz). Anhaltswerte für F_c sind in Bild 3 dargestellt. Bei den in DIN 4108-2 angegebenen Anhaltswerten dienen

die F_C -Werte für geschlossenen Sonnenschutz ($F_C = 0,1$) der Information und sollten für den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes nicht verwendet werden.

Im dargestellten Diagramm ist - neben F_C auf der Abszisse - der **Fensterflächenanteil** variiert (WINA), d.h. für die unterschiedlichen Werte 30, 50, 70 und 100 % sind die Verbindungslinien der Datenpunkte in verschiedenen Graustufen eingefärbt (hell = 30 bis dunkel = 100 %). Weitere für die aktuelle Darstellung konstant gehaltene Parameter sind im Diagramm unten links aufgeführt, siehe "Const: ...". Die Kürzel für die Bezeichnungen der Varianten sind in Abschnitt 9.1 zusammengefasst und werden dort erläutert.

In den Berechnungen werden jeweils zwei Fälle gegenübergestellt, d.h. das Modell mit Einsatz von PCM im Vergleich zur **Referenz ohne PCM**. Die Definition der Referenzfälle ist für die drei Systeme unterschiedlich. Im Diagramm stehen die durchgezogenen Linien für den Fall mit PCM und die gestrichelten für die Referenz ohne PCM.

Auf der **Sekundärachse** rechts ist der Einfluss des Einsatzes von PCM im jeweiligen System (hier Bauplatte) aufgetragen, d.h. die Minderung in [%] des Falls mit PCM gegenüber der Referenz ohne PCM. Die entsprechenden Daten sind mit einer gepunkteten Linie verbunden.

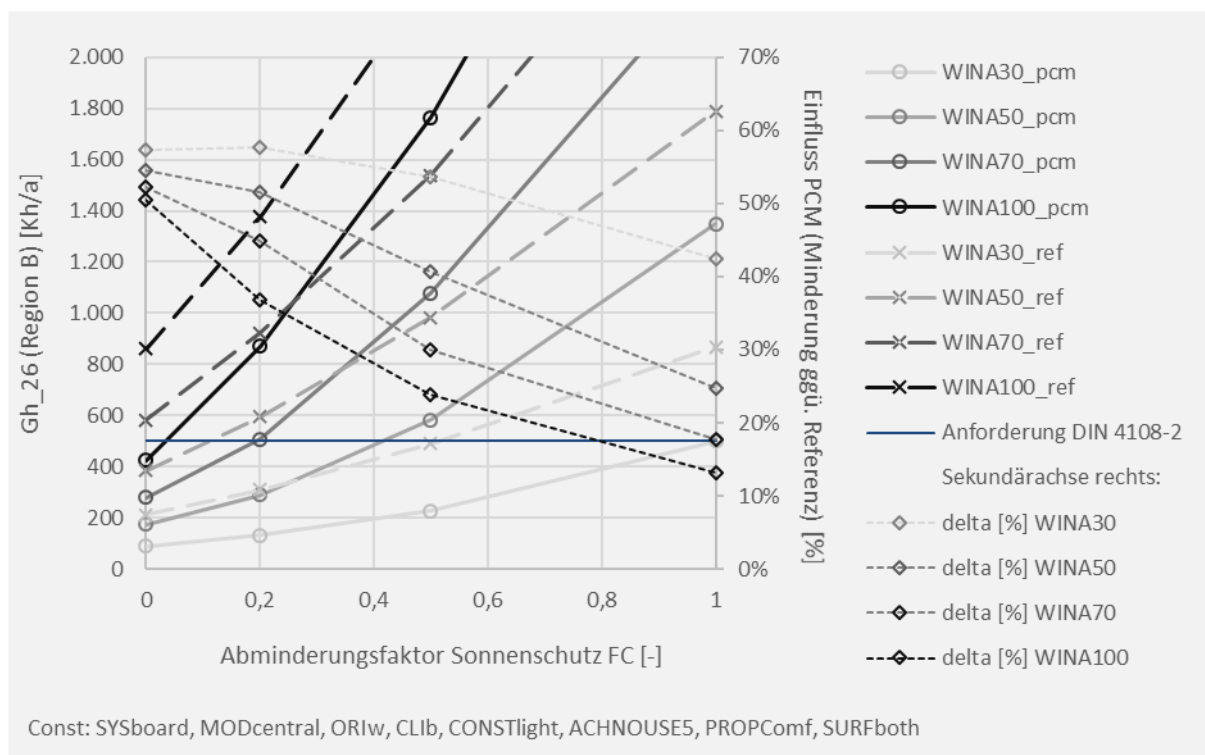


Bild 10: Simulationsergebnisse Bauplatte - Übertemperaturgradstunden

Die Skalierung der Ordinate ist i.d.R. begrenzt (hier 2.000 Kh/a), um den relevanten Bereich um den **Anforderungswert** herum besser darstellen zu können, im Diagramm die horizontale Linie bei 500 Kh/a (Anforderungswert DIN 4108-2 für Nichtwohngebäude). Daher kann die wichtigste Interpretation des Diagramms einfacher abgelesen werden: "Kann mit dieser Konfiguration die Mindestanforderung an den sommerlichen Wärmeschutz eingehalten werden (Werte unterhalb Anforderung) oder nicht (darüber)?".

Eine Weiterentwicklung der beschriebenen Diagrammdarstellung ist in Bild 11 aufgenommen. Dort ist auf der Sekundärachse rechts die prozentuale **Über-/Unterschreitung S_{zul}** dargestellt, d.h. des zulässigen Grenzwertes für das vereinfachte Verfahren der Sonneneintragskennwerte. Hinweis: die Skalierung der Ordinate ist dabei weiter begrenzt auf 1.000 Kh/a, um die Anforderungsgröße weiter zu fokussieren.

Es ist zu beachten, dass in dem Diagramm über die Nutzung der primären und der sekundären Ordinate unterschiedliche Größen aufgetragen sind, welche auf sehr unterschiedlichen Berechnungsansätzen und -verfahren beruhen. Es sollte daher vermieden werden, einen Vergleich der absoluten Werte anzustellen. Jedoch können auf beiden Seiten - also für beide Verfahren - die Werte rund um die Anforderungsgrößen ins Verhältnis gesetzt werden, also wann die zulässigen Anforderungen für die Übertemperaturgradstunden bzw. an den Sonneneintragskennwert erfüllt sind.

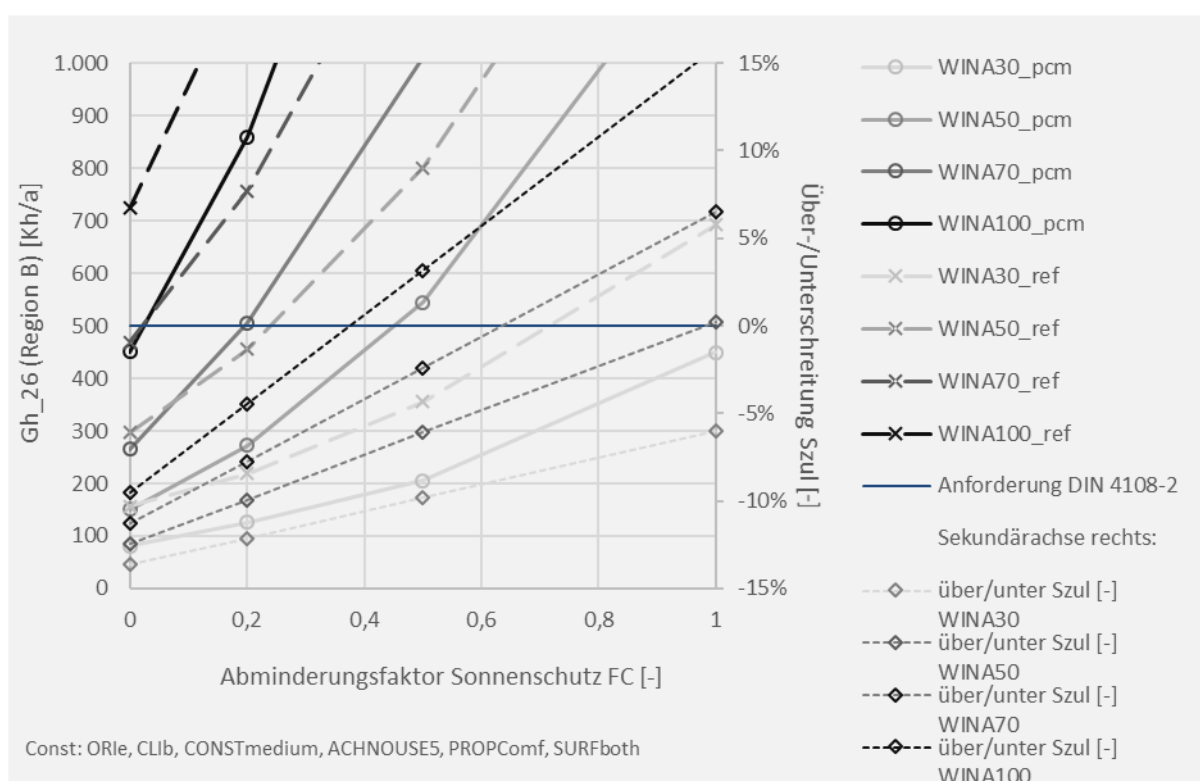


Bild 11: Simulationsergebnisse Bauplatte - Über-/Unterschreitung S_{zul} .

9.2.2 Nutzenergie DIN V 18599

Im zweiten Schwerpunkt dieses Forschungsprojekts wird die Berechnung der Nutzenergie für Heizen und Kühlen auf Basis der DIN V 18599 behandelt. Für den vorliegenden Untersuchungsgegenstand, d.h. PCM-Systeme, liegt der Einsatzbereich primär beim Kühlfall, daher beziehen sich die dargestellten Auswertungen auch hauptsächlich auf die Nutzenergie Kühlen.

Die für die Darstellungen gewählte Kombination der variierten Parameter entspricht - wie bei den zuvor beschriebenen Auswertungen des sommerlichen Wärmeschutzes - einem Ausgangsfall, welcher einem mittleren Parametersatz entspricht (Orientierung Ost, Klima Potsdam, mittlere Bauweise, ohne erhöhte Nachtlüftung).

In diesem Abschnitt soll vorrangig die Methode der Auswertung beschrieben werden, die Interpretation der Ergebnisse erfolgt im Anschluss.

- a) Gegenüberstellung Nutzenergie **ohne** PCM: Simulation und Berechnung DIN V 18599

Für die Untersuchungen werden Simulationsmodelle entwickelt, welche auf Grundlage gleicher bzw. mindestens ähnlicher also vergleichbarer Randbedingungen ebenfalls zur Berechnung des Energiebedarfs für Heizen und Kühlen herangezogen werden. In diesem Fall wird also die physikalisch gleiche Größe mit unterschiedlichen Berechnungsverfahren bestimmt, d.h. mittels instationärer thermischer Simulation auf Stundenbasis und über einen Bilanzansatz auf Tages- bzw. Monatsbasis. Eine exakte Übereinstimmung der Ergebnisse beider Verfahren kann es nicht geben, jedoch sollte eine gewisse Nähe der Werte zu erwarten sein, im Rahmen des Vertrauens in die beiden Berechnungsansätze.

In Bild 12 sind die Berechnungsergebnisse für die Nutzenergie Kühlen dargestellt. Die Linien verbinden die Werte aus den Simulationsrechnungen (durchgezogen) sowie der Berechnung gemäß DIN V 18599 (gestrichelt). Die prozentuale Abweichung der Simulation gegenüber der Berechnung nach DIN V 18599 sind auf der Sekundärachse aufgetragen.

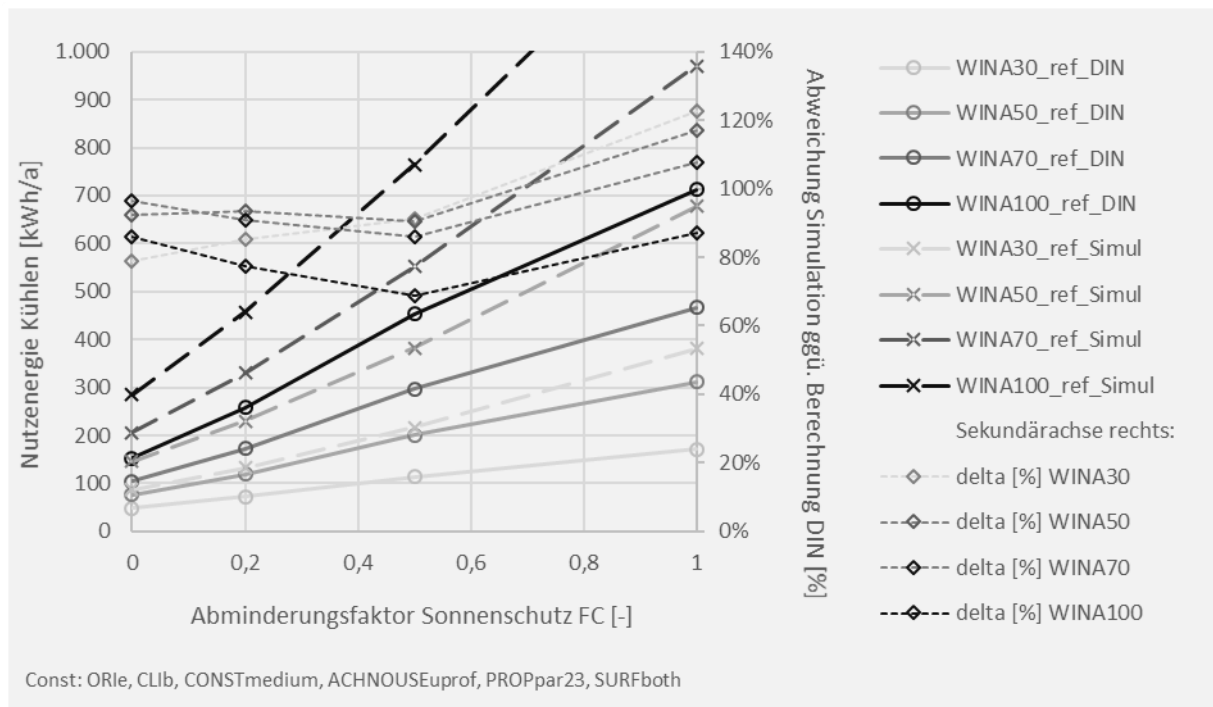


Bild 12: Bauplatte - Nutzenergie Kühlen ohne PCM - Simulation vs. DIN V 18599

Die Ergebnisse der Parameterstudien und der Gegenüberstellung sollen für den Fall ohne Einsatz von PCM zeigen, inwieweit die beiden Verfahren eine hinreichende Vergleichbarkeit aufweisen, um auf deren Grundlage im Folgenden die Herleitung eines Berechnungsansatzes für den Einsatz von PCM im normativen Berechnungsverfahren der DIN V 18599 zu entwickeln.

b) Gegenüberstellung Nutzenergie Simulation: **mit und ohne** Einsatz von PCM

Der Einfluss des Einsatzes von PCM wird mittels thermischer Simulation quantifiziert und kann dann, wie in Bild 13 beispielhaft gezeigt, graphisch dargestellt werden. Dabei ist analog zur Darstellung der Ergebnisse der Übertemperaturgradstunden, die energetischen Größen bezogen auf die linke Ordinate aufgetragen, die prozentuale Minderung des Falles mit PCM gegenüber dem Fall ohne PCM bezieht sich auf die rechte Ordinate.

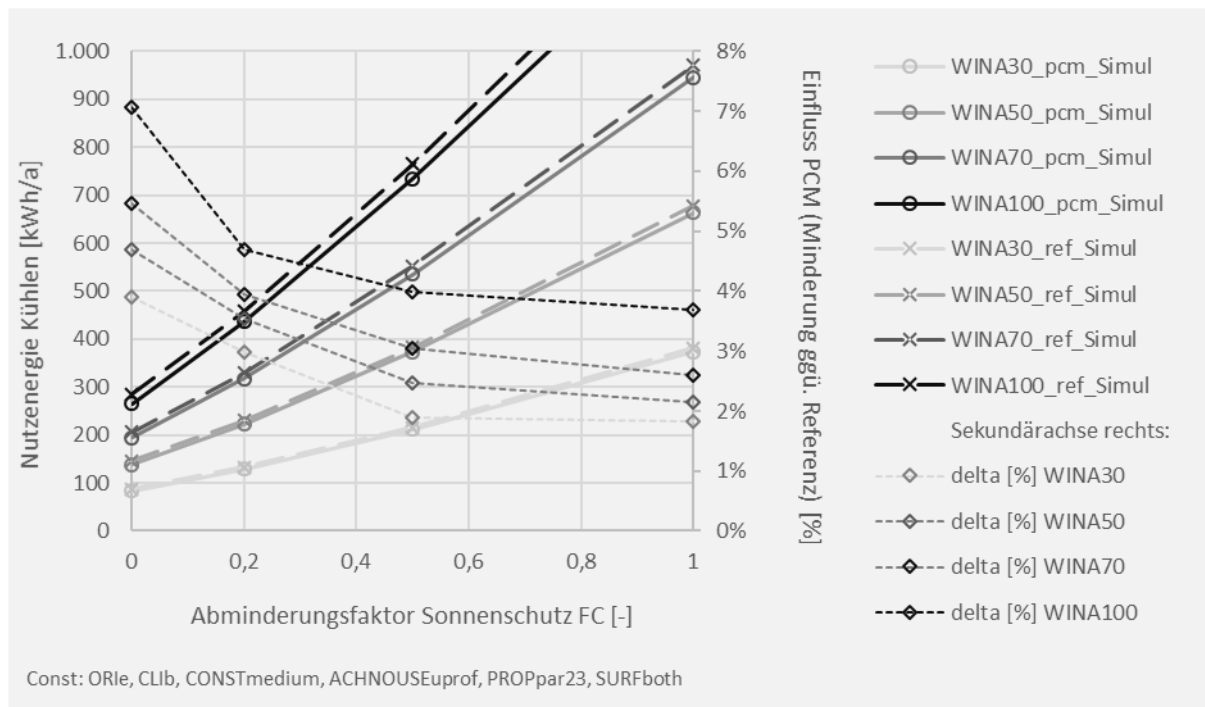


Bild 13: Bauplatte - Nutzenergie Kühlen Simulation - ohne vs. mit PCM

Diese Darstellung wird gewählt, wenn Aussagen zum Einfluss des PCM getroffen werden sollen, unabhängig vom Berechnungsverfahren.

c) Gegenüberstellung Nutzenergie **mit** PCM: Simulation und Berechnung DIN V 18599

Ähnlich wie die unter a) beschriebene Auftragung für den Fall ohne PCM kann auch für den Fall mit PCM ein Vergleich der Ergebnisse der beiden Verfahren erfolgen, d.h. die Ergebnisse der thermischen Simulation können denen der normativen Berechnung nach DIN V 18599 gegenüber gestellt werden. Allerdings mit dem Unterschied, dass es in der Norm bisher keine Berechnungsvorschrift für die Berücksichtigung von PCM-Systemen gibt. Diesen Umstand zu ändern ist Gegenstand des vorliegenden Forschungsprojekts.

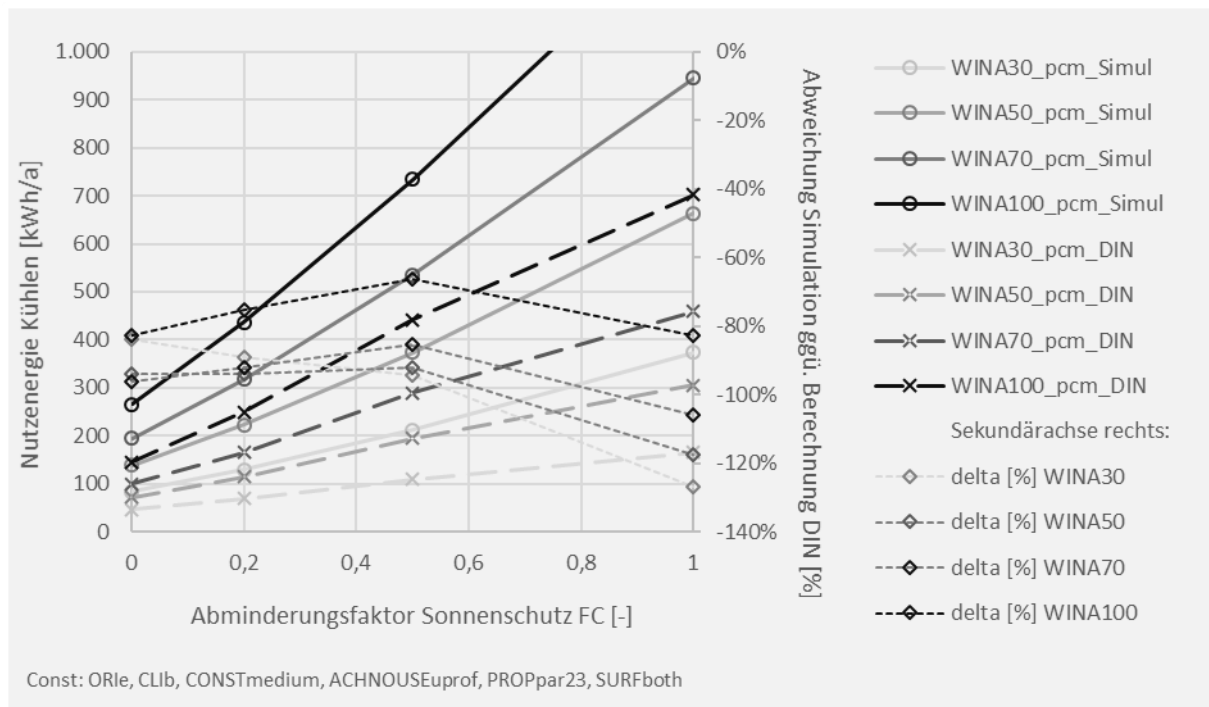


Bild 14: Bauplatte - Nutzenergie Kühlen mit PCM - Simulation vs. DIN V 18599 - gewählter Ansatz PCM: Gebäudeschwere

Diese graphische Gegenüberstellung erlaubt es, auf Grundlage der Analyse des Ausgangsfalls ohne PCM verschiedene Ansätze für die Behandlung der PCM-Systeme im Rahmen der Berechnung der Nutzenergie nach DIN V 18599 zu untersuchen.

9.3 Bauplatte - sommerlicher Wärmeschutz DIN 4108-2

In den hier aufgeführten Ergebnisdarstellungen sind folgende Parameter konstant gehalten und werden daher nicht explizit aufgeführt:

- SYSboard - System Bauplatte
- MODcentral - Auswertungen zu Zentralraummodul, Eckraum wird nicht betrachtet
- ENVE2016 - Ausführung Gebäudehülle (U-, g-, n₅₀-Werte) gemäß EnEV 2016
- SUSHlauto - Sonnenschutzsteuerung automatisch, da Auswertungen auf die Variation des F_c-Wertes abgestimmt sind, d.h. dem Minderungsfaktor infolge Sonnenschutz

- UPROFoffice - Nutzungsprofil Gruppenbüro (gem. DIN V 18599-10), Nutzungen Klassenzimmer und Wohnen für diesen Fall nicht weiter betrachtet, da kein weiterer Erkenntnisgewinn zu erwarten ist
- VENTwin - Fensterlüftung, keine mechanische Lüftung (systembedingt)
- ACHUSEuprof - keine erhöhte Taglüftung (gem. Randbedingungen DIN 4108-2)
- GAINuprof - über das Nutzungsprofil hinausgehende weitere Variation der internen Wärmeeinträge in Zuge der Bearbeitung verworfen, da äquivalente Aussagen über Variation der solaren Wärmeeinträge möglich
- AMO2 - Belegung bzw. Menge PCM gemäß definierter Variante 2, siehe Ausführungen in 9.1.

9.3.1 Einfluss Gebäudeschwere - mittlerer Parametersatz

Für eine erste Analyse der Berechnungsdaten wird neben der Variation des Sonnenschutzes (F_c) und des Fensterflächenanteils (WINA) der Einfluss der Gebäudeschwere betrachtet.

Als weitere Parameter sind die Orientierung West (**ORIw**) und die Klimaregion B (**CLib**) konstant gehalten und stellen einen "mittleren Parametersatz" dar, also Eigenschaften in der Mitte der Variationsbreite.

Einige weitere konstante Parameter repräsentieren eher eine optimale Ausführung, diese Entscheidung beruht auf der Auswertung der Daten und wird im Folgenden erläutert. Dies betrifft den hohen Nachtluftwechsel (**ACHNOUSE5**) sowie die PCM-Eigenschaften und -Flächenbelegung (**PROPcomf**, **SURFboth**).

Die Zugrundelegung des hohen Nachtluftwechsels ist in keinem Fall Standard (geschossübergreifende Lüftungsmöglichkeit erforderlich) und sollte möglich nicht als Ausgangs- oder Basisfall zugrunde gelegt werden. Im Nichtwohngebäudebereich ist wohl eher die Situation "ohne Nachtlüftung" der Standard, was dazu führt, dass i.d.R. passive Systeme nicht funktionieren. Für die vorliegenden Auswertungen wird dennoch der Fall mit hoher Nachtlüftung betrachtet, da die Wertebereiche der Ergebnisse mit dem (geringeren) erhöhten Nachtluftwechsel weniger auswertbare Datenpunkte im Bereich der Zulässigkeit ergeben (Einhaltung Anforderungen sommerlicher Wärmeschutz), siehe Ergebnisse in Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**

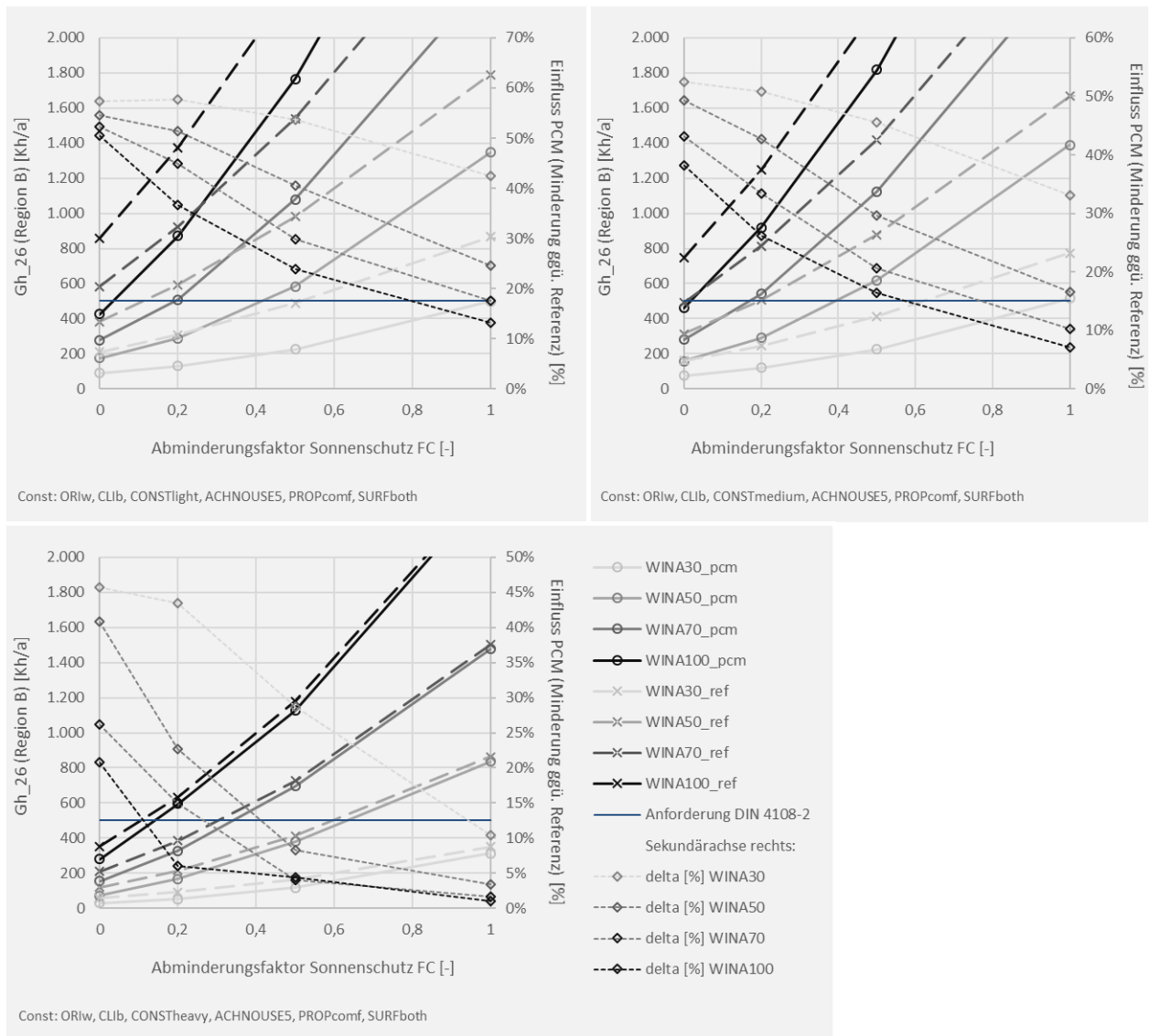


Bild 15: Simulationsergebnisse Bauplatte - Einfluss Gebäudeschwere (CONST): leicht (oben links), mittel (oben rechts), schwer (unten)

Die Diagramme in Bild 15 zeigen die Variation des Fensterflächenanteils (WINA) im Diagramm für verschiedene Bauweisen je Diagramm (CONST). Die Werte für $F_c = 0$ dienen nur der theoretischen Grenzbetrachtung.

Die Auswertung der Diagramme erfolgt unter zwei Gesichtspunkten, d.h.

- Einhaltung zulässiger Anforderungswert und F_c : Beginnend mit der **schweren Bauweise** unten zeigt sich, dass z.B. für den Fall eines Fensterflächenanteils von 50% (WINA50, zweite Graustufe) die Übertemperaturgradstunden bis ca. $F_c = 0,6$ unterhalb des Anforderungswertes von 500 Kh/a liegen. Dies entspricht einem einfachen außenliegenden Sonnenschutz. Beim Fensterflächenanteil von 70% muss für die Einhaltung der Anforderungen der Wert für F_c auf ca. 0,3 abgesenkt werden (mitt-

lerer außenliegender Sonnenschutz). Im Falle der Vollverglasung (100%) liegt der Grenzwert für F_c bei 0,1, was einem vollständig geschlossenen außenliegendem Sonnenschutz entspricht. Gemäß DIN 4108-2 sollte dieser Wert für den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes nicht verwendet werden und ist nur informativ angegeben. Wird jedoch der F_c -Wert nach DIN EN 13363-2 rechnerisch nachgewiesen, so sind auch Werte um 0,1 möglich.

Bei der **mittelschweren** Bauweise ist nur der Fall 30% Fensterflächenanteil mit einem einfachen außenliegenden Sonnenschutz baubar, ab 50% muss der Sonnenschutz schon optimal ausgeführt sein. Bei der **leichten** Bauweise wird dieser Trend noch verstärkt.

- Einfluss PCM: der Vergleich der Linien mit PCM ($_pcm$, durchgezogen) und ohne PCM ($_ref$, gestrichelt) zeigt, dass bei **schwerer** Bauweise die Werte nah beieinander liegen und erst mit der **mittleren und leichten** Bauweise bis zu 55% differieren. Die Differenz sinkt mit abnehmenden Werten für F_c und den Fensterflächenanteil, was sich u.a. dadurch erklärt, dass die relative prozentuelle Minderung bei kleinen absoluten Werten als stärker wahrgenommen wird. Werden die Werte für den Einfluss bzw. die Minderung PCM gegenüber Referenz nur im Bereich von üblichen außenliegenden Sonnenschutzvorrichtungen betrachtet (F_c zwischen 0,2 und 0,5), so ergeben sich die in Tabelle 22 zusammengefassten Wertebereiche für die mögliche Minderung (Werte durch 5 teilbar gerundet).

Tabelle 22: Einfluss PCM (Minderung ggü. Referenz) für Bereich $F_c = 0,2$ bis 0,5. Werte gerundet.

Bauweise	leicht		mittel		schwer	
	CONSTlight		CONSTmedium		CONSTheavy	
	$F_c = 0,2$	$F_c = 0,5$	$F_c = 0,2$	$F_c = 0,5$	$F_c = 0,2$	$F_c = 0,5$
Fensterflächenanteil	Minderung Fall mit PCM ggü. Referenz					
WINA30	60%	55%	50%	45%	45%	30%
WINA50	50%	40%	45%	30%	25%	10%
WINA70	45%	30%	35%	20%	15%	5%
WINA100	35%	25%	25%	15%	5%	5%

Const: ORlw, CLlb, ACHNOUSE5, PROPcomf, SURFboth

Der mindernde Einfluss des PCM ist bei der schweren Bauweise nicht sehr ausgeprägt, diese stellt jedoch auch nicht den üblichen Anwendungsfall dar, allerdings zeigt sich bei der mittleren Bauweise und einem Fensterflächenanteil von 70%, dass erst beim Einsatz von PCM die Werte bei einem "baubaren" $F_c = 0,2$ unterhalb der Anforderung liegen, bei leichter Bauweise und 50% Fensterflächenanteil gilt dies entsprechend. Siehe auch Erläuterungen zu Tabelle 23.

Für die Grenzbetrachtung der Einhaltung der Anforderungen für die Übertemperaturgradstunden $G_{h_x} = 500 \text{ Kh/a}$ (Anforderung Nichtwohngebäude) sind in Tabelle 23 die F_C -Werte zusammengefasst, bei denen der Anforderungswert gerade eingehalten wird. Es zeigt sich, dass bei Vollverglasung (WINA100) nur bei der schweren Bauweise und dem Einsatz von PCM ein realistischer Wert von $F_C = 0,2$ angesetzt werden muss bzw. kann. Bei 70% Fensterflächen gilt dies analog für die leichte und mittlere Bauart, ebenso wie für die Kombination von 50% Fensterflächen und leichter Bauart. Die Fensterflächenanteile von 30% sind durchweg wenig kritisch.

Tabelle 23: Höchstwert F_C zur Einhaltung Anforderung Sonneneintragskennwert für die drei Bauweisen und die Fälle mit und ohne (Referenz) PCM.

Bauweise Fall Fensterflächen- anteil	leicht CONSTlight		mittel CONSTmedium		schwer CONSTheavy	
	Referenz	PCM	Referenz	PCM	Referenz	PCM
	F_C bei Anforderungswert $G_{h_x} = 500 \text{ Kh/a}$					
WINA30	0,57	0,99	0,68	0,96	1	1
WINA50	0,12	0,48	0,23	0,48	0,67	0,71
WINA70	0	0,22	0	0,21	0,38	0,44
WINA100	0	0,01	0	0	0,12	0,2

Const: ORlw, CLlb, ACHNOUSE5, PROPcomf, SURFboth

9.3.2 Einfluss Orientierung und Klimaregion

Aufbauend auf den zuvor beschriebenen Auswertungen, bei denen die Parameter Orientierung (West) und Klimaregion (B) konstant gehalten wurden, sind in den nachfolgenden Diagrammen die Werte weiter variiert und gegenübergestellt.

Um die Zahl der Variationen zu begrenzen ist in den Diagrammen die Gebäudeschwere konstant gehalten, d.h. es wird eine **mittelschwere Bauart** betrachtet. Bei den tabellarischen Darstellungen sind z.T. auch die anderen Bauschweren enthalten.

In Bild 16 ist oben links der bereits bekannte Fall der West-Orientierung dargestellt (mittlere Bauschwere), rechts daneben sind die Werte für Ost dargestellt, unten die für Süd. Skalierung und Legende sind gleich.

Durchweg liegen die **absoluten Werte** für die Übertemperaturgradstunden bei der Ost-Orientierung etwas unter und bei der Süd-Orientierung etwas (mehr) über den Werten für Westen. Dies gilt v.a. für große Werte für F_C also schlechteren Sonnenschutz. Ausnahmen finden sich bei der Kombination von Süd-Orientierung, hohen Fensterflächenanteilen und gutem Sonnenschutz (F_C klein),

dort liegen die Kurven eher unterhalb des Anforderungswertes als bei den anderen Orientierungen.

Bei der **relativen Betrachtung** der Minderung bei PCM-Einsatz sind die erzielbaren Absenkungen der Übertemperaturgradstunden in Fällen ohne oder mit schlechtem Sonnenschutz bei Ost- und Süd-Orientierung etwas höher als im Westen. Bei Einsatz von außenliegendem Sonnenschutz (z.B. $F_c = 0,2$) wirkt das PCM im Süden besser als im Westen, im Osten jedoch sind die Minderungen weniger ausgeprägt, also geringer.

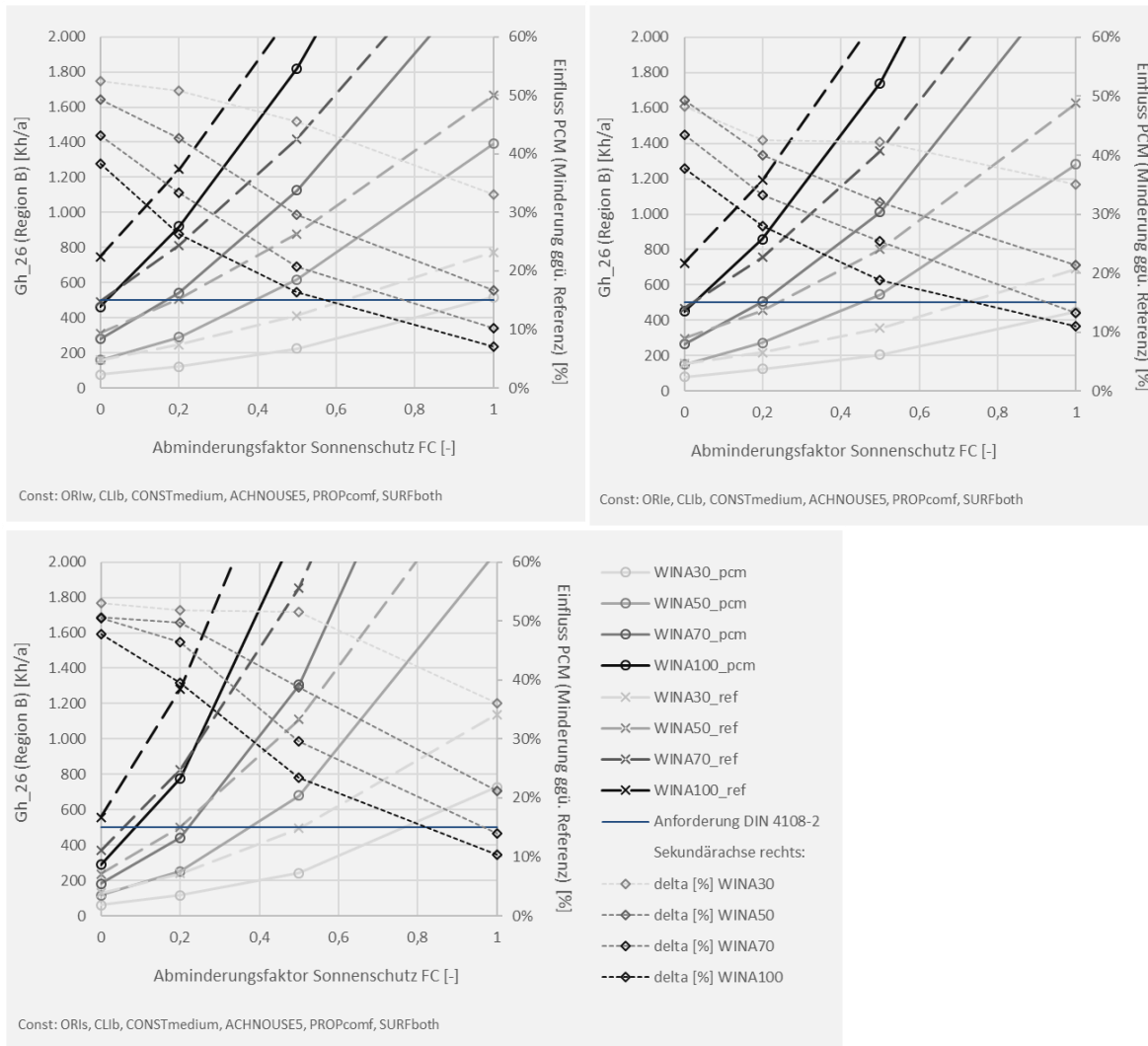


Bild 16: Simulationsergebnisse Bauplatte - Einfluss Orientierung (ORI): West (oben links), Ost (oben rechts), Süd (unten)

Der Vollständigkeit halber werden hier auch die Ergebnisse für die Nord-Orientierung dargestellt, der Fall ist jedoch für die Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes nicht relevant.

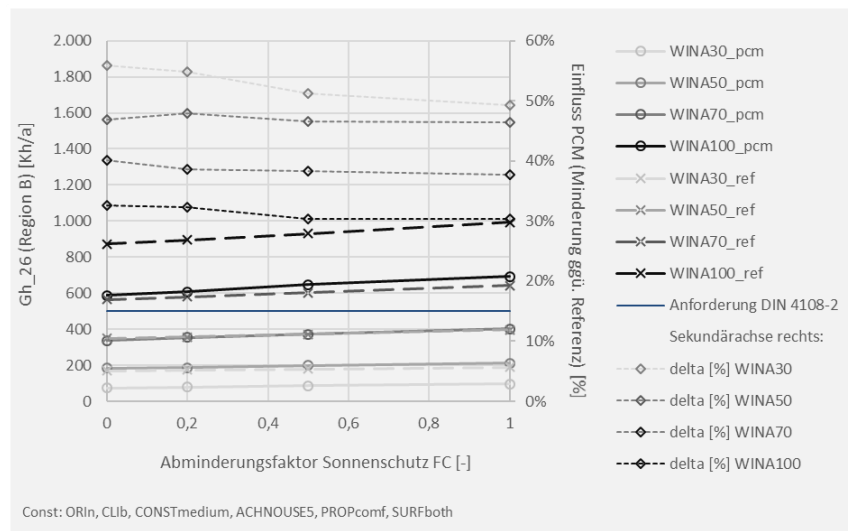


Bild 17: Simulationsergebnisse Bauplatte - Einfluss Orientierung (ORI): Nord

Die in den Diagrammen in Bild 16 erkennbaren Tendenzen sind auch in Tabelle 24 ablesbar, in der die Ergebnisse für alle Gebäudeschweren und Orientierungen zusammengefasst sind. Tabellarisch aufgeführt sind dort wieder die Grenzbetrachtungen zu den erforderlichen F_c -Werten um die Anforderungen gerade einhalten zu können.

Tabelle 24: Höchstwert F_c zur Einhaltung Anforderung Sonneneintragskennwert für die drei Bauweisen und die Fälle mit und ohne (Referenz) PCM.

Vier Orientierungen: West (oben), Ost, Süd, Nord (unten).

Bauweise	leicht		mittel		schwer	
	CONSTlight		CONSTmedium		CONSTheavy	
	Fall Referenz	PCM	Fall Referenz	PCM	Fall Referenz	PCM
Fensterflächen- anteil	F_c bei Anforderungswert $G_{h_x} = 500 \text{ Kh/a}$					
WINA30	0,57	0,99	0,68	0,96	1	1
WINA50	0,12	0,48	0,23	0,48	0,67	0,71
WINA70	0	0,22	0	0,21	0,38	0,44
WINA100	0	0,01	0	0	0,12	0,2
Const: ORlw , CLlb, ACHNOUSE5, PROPcomf, SURFboth						
WINA30	0,63	1	0,76	1	1	1
WINA50	0,16	0,51	0,27	0,52	0,75	0,79
WINA70	0	0,24	0	0,24	0,44	0,5
WINA100	0	0,02	0	0	0,18	0,24
Const: ORle , CLlb, ACHNOUSE5, PROPcomf, SURFboth						
WINA30	0,47	0,84	0,57	0,82	1	1
WINA50	0,16	0,46	0,25	0,46	0,66	0,66
WINA70	0	0,28	0,06	0,27	0,42	0,46
WINA100	0	0,12	0	0,11	0,21	0,27
Const: ORls , CLlb, ACHNOUSE5, PROPcomf, SURFboth						
WINA30	1	1	1	1	1	1
WINA50	1	1	1	1	1	1
WINA70	0	1	0	1	1	1
WINA100	0	0	0	0	1	1
Const: ORln , CLlb, ACHNOUSE5, PROPcomf, SURFboth						

Die Ergebnisse für die Variation der drei **Klimaregionen** gemäß DIN 4108-2 sind in Bild 18 dargestellt. In den früheren Ausgaben der DIN 4108-2 wurden die Klimaregionen noch mit "sommerkühl", "gemäßigt" und "sommerheiß" bezeichnet, in der aktuellen Ausgabe entspricht Region A dem Standort Rostock, Region B dem mittleren Klima in Potsdam und Region C erhält die Klimadaten von Mannheim. Die Bestimmung der Übertemperaturgradstunden hängt hierbei von der jeweiligen Region ab, da für diese unterschiedliche Grenztemperaturen gelten, d.h. G_{h_x} entspricht 25, 26 oder 27 °C für die Regionen A, B und C. Siehe auch Beschriftung der Ordinate.

In der Abbildung enthält das Diagramm rechts oben die bereits vorgestellten Ergebnisse für das mittlere Klima der Region B mit der Grenztemperatur 26 °C.

Links daneben sind die Werte für Region A dargestellt, unten Region C, mit den jeweils angepassten Grenztemperaturen 25 bzw. 27 °C.

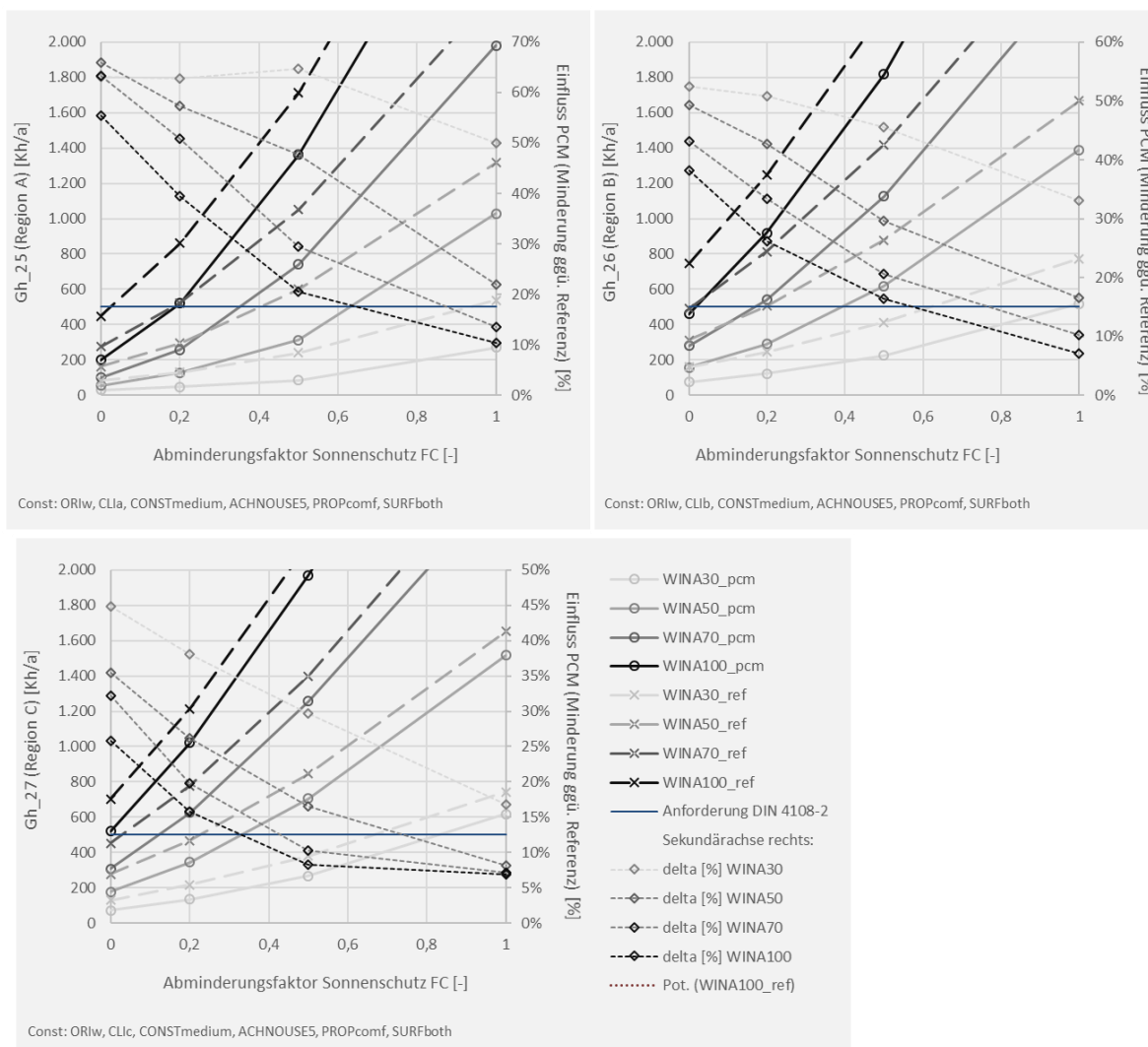


Bild 18: Simulationsergebnisse Bauplatte - Einfluss Klimaregion (CLI):
Region A (oben links), Region B (oben rechts), Region C (unten)

In Bild 18 und Tabelle 25 ist zu ersehen, dass die Zahlenwerte für die Übertemperaturgradstunden (bezogen auf die jeweilige Grenztemperatur) für **Klimaregion A** gegenüber B durchweg abgesenkt sind. Die für die Einhaltung des Grenzwertes anzusetzenden F_c -Werte können bis zu einem Differenzwert von ca. 0,3 angehoben werden. Der Einfluss des PCM (Minderung ggü. Referenz) ist bei Klimaregion A ausgeprägter als bei Region B.

Bei **Klimaregion C** zeigt der Vergleich mit den Werten aus Region B einen weniger eindeutigen Trend. Wie zu erwarten, liegen die Werte zwar überwiegend über den Ergebnissen des mittleren Klimas, jedoch gibt es Ausnahmen von diesem Trend welche sich auf den Referenzfall beziehen. In der Tabelle liegen einige F_c -Werte der Region C daher etwas höher als bei Region B. Diese Ergebnisse

ergeben sich aus den unterschiedlich angesetzten Bezugstemperaturen. Die fallweise erforderlichen F_C -Werte sind sehr eng beieinander und eher als Bestätigung zu sehen, dass die unterschiedlichen Bezugstemperaturen recht gut passen.

Tabelle 25: Höchstwert F_C zur Einhaltung Anforderung Sonneneintragskennwert für die drei Bauweisen und die Fälle mit und ohne (Referenz) PCM.

Drei Klimaregionen: Region A (oben), Region B, Region C (unten).

Bauweise	leicht		mittel		schwer	
	CONSTlight		CONSTmedium		CONSTheavy	
	Referenz	PCM	Referenz	PCM	Referenz	PCM
Fensterflächenanteil	F_C bei Anforderungswert $G_{h_x} = 500 \text{ Kh/a}$					
WINA30	0,88	1	0,93	1	1	1
WINA50	0,43	0,78	0,48	0,71	0,84	0,87
WINA70	0,17	0,53	0,22	0,47	0,57	0,61
WINA100	0	0,31	0	0,25	0,33	0,4
Const: ORlw, CLla, ACHNOUSE5, PROPcomf, SURFboth						
WINA30	0,57	0,99	0,68	0,96	1	1
WINA50	0,12	0,48	0,23	0,48	0,67	0,71
WINA70	0	0,22	0	0,21	0,38	0,44
WINA100	0	0,01	0	0	0,12	0,2
Const: ORlw, CLlb, ACHNOUSE5, PROPcomf, SURFboth						
WINA30	0,64	0,87	0,72	0,85	1	1
WINA50	0,19	0,42	0,28	0,42	0,66	0,68
WINA70	0	0,15	0	0,16	0,38	0,41
WINA100	0	0	0	0	0,13	0,15
Const: ORlw, CLlc, ACHNOUSE5, PROPcomf, SURFboth						

9.3.3 Einfluss Nachtlüftung

Wie bei den bisherigen Auswertungen schon erwähnt, basieren die dargestellten Untersuchungen auf dem Fall der **hohen Nachtlüftung** mit einem Luftwechsel von 5 h^{-1} während der Stunden außerhalb der Nutzungszeit (Nichtwohngebäude 18:00 Uhr bis 7:00 Uhr; Wohngebäude 23:00 Uhr bis 6:00 Uhr).

Neben dem "hohen" Wert für die Nachtlüftung sieht die Norm auch einen "**erhöhten**" Wert von 2 h^{-1} vor, z.B. ermöglicht durch nächtliche Fensterlüftung aber auch bei Einsatz einer Lüftungsanlage, bei welcher ggf. gegenüber der normalen Auslegung etwas leistungsstärkere Ventilatoren erforderlich sind.

Bei der hohen Nachtlüftung von 5 h^{-1} fordert die Norm, dass zur Erhöhung des Luftwechsels die Möglichkeit besteht, den zu bewertenden Raum oder Raum-

bereich geschossübergreifend lüften zu können, z.B. über ein angeschlossenes Atrium.

Weitere Bedingungen für die Erhöhung des Nachtluftwechsel beziehen sich auf die Innentemperatur (Lufttemperatur), d.h.

- a) sie muss über der Raum-Solltemperatur liegen (Heizfall, Wohngebäude 20 °C; Nichtwohngebäude 21 °C)
- b) und sie muss über der Außenlufttemperatur liegen.

Die in DIN 4108-2 ebenfalls vorgesehene Möglichkeit des erhöhten **Tagluftwechsels** auf 3 h^{-1} hat wegen der geringeren Temperaturdifferenzen einen weniger hohen Einfluss auf die Absenkung der Raumtemperaturen verglichen mit den Ergebnissen für die Nachtlüftung, daher wurde dieser Fall in den vorliegenden Untersuchungen nicht weiter betrachtet.

In Bild 19 ist der bekannte Basisfall (mittlerer Parametersatz) dargestellt, d.h. Orientierung West, mittleres Klima, mittelschwere Bauweise. Die variierten Linien gaben bisher unterschiedliche Fensterflächenanteile wieder, nun stehen die unterschiedlichen Graustufen für die drei Variationen der Nachtlüftung, im Einzelnen

- keine erhöhte Nachtlüftung, d.h. der Luftwechsel außerhalb der Nutzungszeit ("ACH no use" >> "ACHNOUSE") entspricht dem Wert, welcher gemäß Nutzungsprofil vorgesehen ist ("userprofile" >> "uprof"). Im Diagramm mit **ACHNOUSEuprof** gekennzeichnet, heller Grauton.
- erhöhter Nachtluftwechsel auf einen Wert von 2 h^{-1} . Im Diagramm mit **ACHNOUS2** gekennzeichnet, mittlerer Grauton.
- hoher Nachtluftwechsel mit einem Wert von 5 h^{-1} . Im Diagramm mit **ACHNOUS5** gekennzeichnet, dunkler Grauton.

Der Fensterflächenanteil ist im Diagramm mit einem mittleren Wert von 50% angesetzt (WINA50).

Es zeigt sich bei diesem mittleren Parametersatz, dass der Fall ohne erhöhte Nachtlüftung praktisch nicht baubar ist, da die Übertemperaturgradstunden weit über dem Anforderungswert liegen. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Erfahrungen der Anwender und Entwickler der Verfahren im Normungskreis.

Durch die Erhöhung des Nachtluftwechsels auf 2 h^{-1} können die Werte für die Übertemperaturgradstunden deutlich abgesenkt werden und kommen dem Anforderungswert nahe, wenn auch nur mit optimalem Sonnenschutz baubar. Eine weitere Erhöhung des Nachtluftwechsels auf 5 h^{-1} kann die Werte v.a. bei hohen F_C -Werten weiter absenken. Der Einfluss des PCM (Minderung ggü. Re-

ferenz) ist bei hohem Nachtluftwechsel ausgeprägter als bei erhöhtem, die Prozentwerte liegen aber nicht weit auseinander.

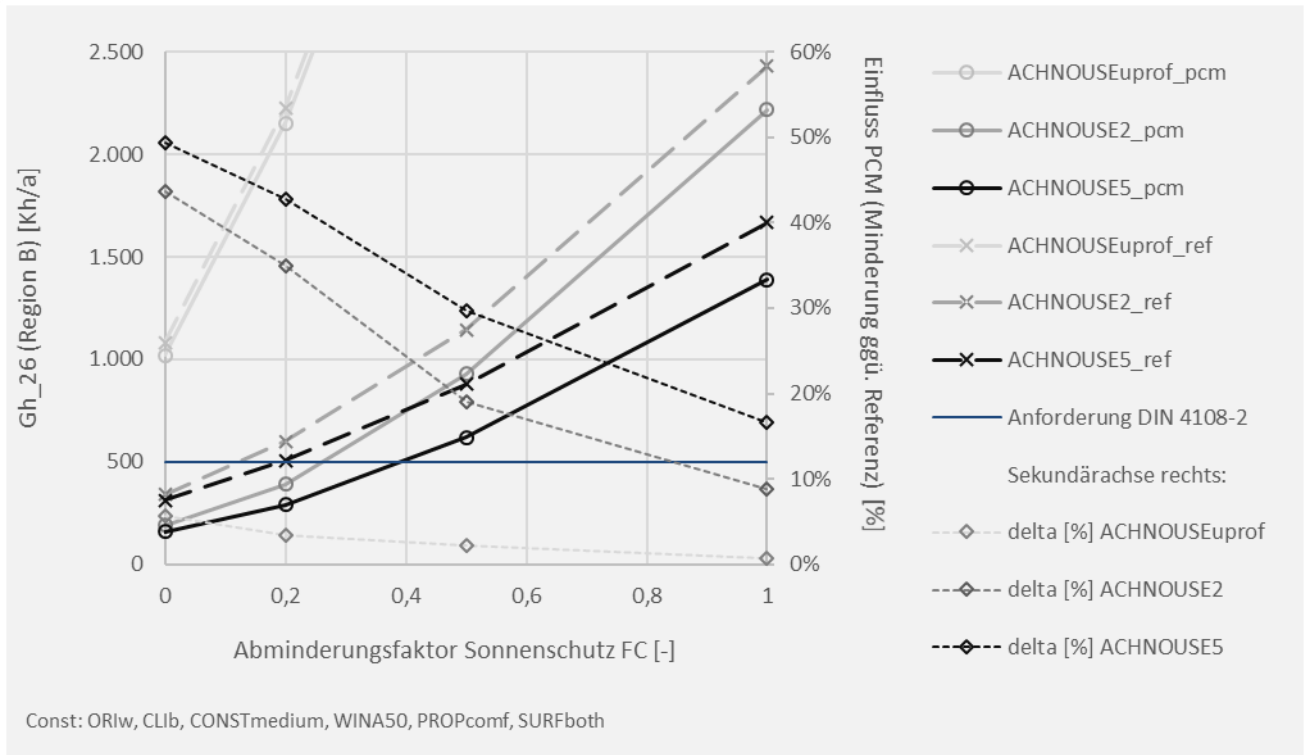


Bild 19: Simulationsergebnisse Bauplatte - Variation Nachtlüftung

Ausgehend von den dargestellten Ergebnissen eines mittleren Datensatzes erfolgen weitere Variationen bzw. Kombinationen unterschiedlicher Randbedingungen. Da sich dieser Fall schon an der Grenze der zulässigen Werte bewegt, können Fälle, die zu einer Verschlechterung des sommerlichen Wärmeschutzes führen, aus der Betrachtung ausgenommen werden. Eine mögliche Verbesserung des sommerlichen Wärmeschutzes kann durch Parametervariationen erfolgen, welche sich auf die folgenden Randbedingungen bezieht, d.h. sommerkühles Klima der Region A, schwere Bauweise und kleine Fensterflächenanteile.

In Bild 20 sind die Variationen ausgehend vom bereits dargestellten Basisfall (oben links) dargestellt. Die Variation der **Orientierung** ergibt für Osten (oben links) nur geringfügige Änderungen bei den Absolutwerten. Das kühlere Klima der **Region A** (Mitte links) führt zu einer moderaten Absenkung der Übertemperaturgradstunden, die Schnittpunkte mit der Linie der Anforderungsgröße zeigen, dass damit der Einsatz von gutem innenliegendem Sonnenschutz ($F_c = 0,6$) zumindest in die Nähe der Baubarkeit rückt. Die **schwere Bauweise** (Mitte rechts) führt nicht nur zu einer Absenkung der absoluten Werte sondern auch zur einer starken Minderung des PCM-Einflusses, was plausibel ist. Den größten Einfluss hat die Veränderung der baulichen Gegebenheiten durch Verringerung des **Fensterflächenanteils** auf 30% (unten). Diese Variante stellt nur eine theoretische Möglichkeit zur Verbesserung des sommerlichen Wärmeschutzes dar, bei

der Umsetzung in Bauvorhabensind eher moderate Verkleinerungen der Fensterflächenanteile zur Nachweisführung üblich.

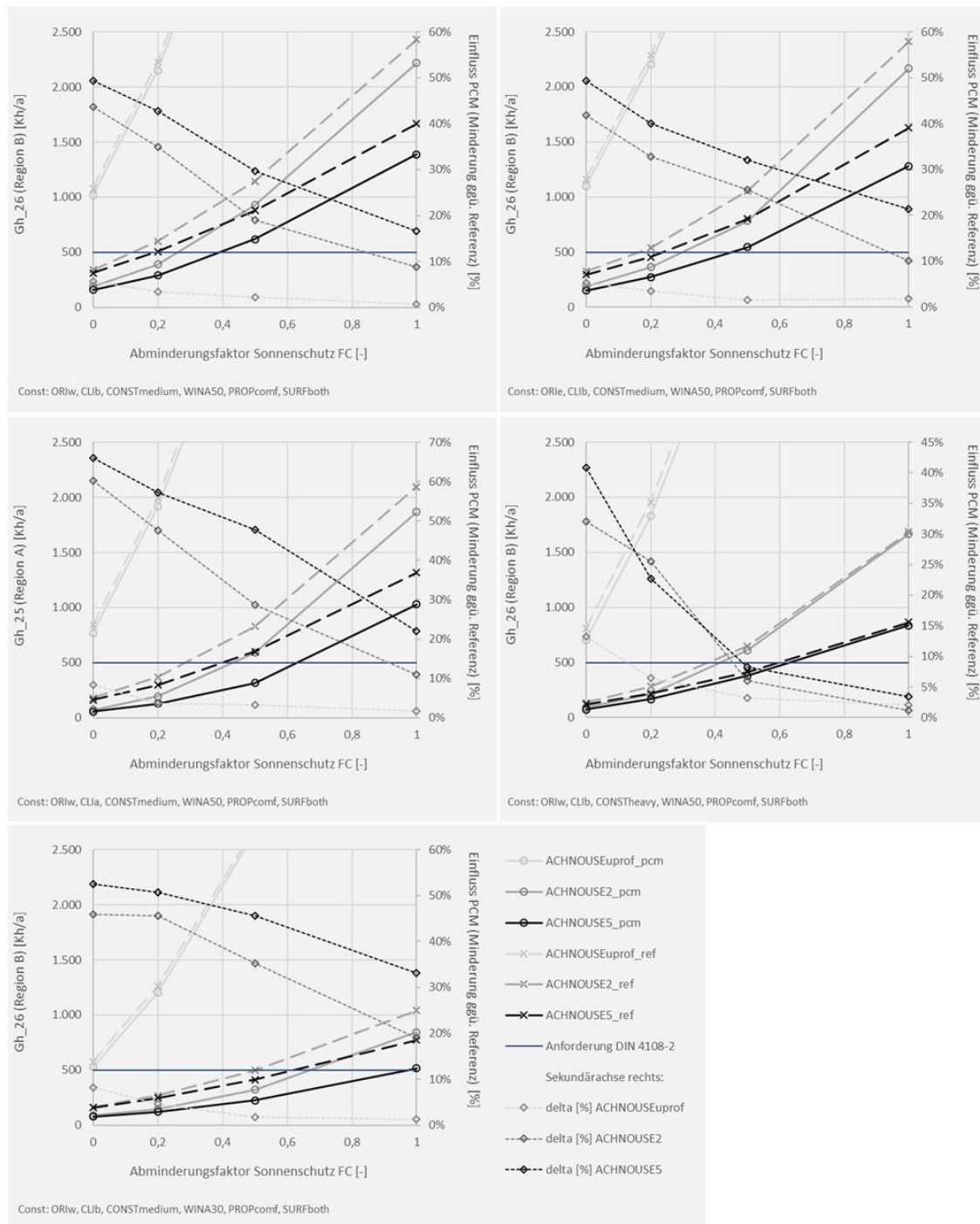


Bild 20: Simulationsergebnisse Bauplatte - Variation einzelner Parameter: oben links Basisfall (mittlere Randbedingungen), oben rechts: Orientierung Ost, Mitte links: Klimaregion A, Mitte rechts: schwere Bauweise, unten Fensterflächenanteil 30%.

Es zeigt sich, dass bei den weiteren Verbesserungen durch die Variation einzelner Parameter zwar die Übertemperaturgradstunden abgesenkt werden können, für den Bereich von innenliegendem Sonnenschutz ($F_c = 0,6 \dots 0,9$) die Werte für den erhöhten Nachtluftwechsel von 2 h^{-1} jedoch weiterhin über dem Anforderungswert liegen. Erst wenn das Parameter so kombiniert werden, dass ein theoretisches Optimum erreicht werden kann - also die **Kombination aller Einzelvarianten** - dann liegen die Werte für den erhöhten und hohen Nachtluftwechsel durchweg im Bereich der Einhaltung der Anforderungen. Für den Fall ohne Erhöhung der Nachtlüftung reichten selbst diese optimierten Randbedingungen nicht aus, um die Anforderungen einzuhalten. Siehe Bild 21.

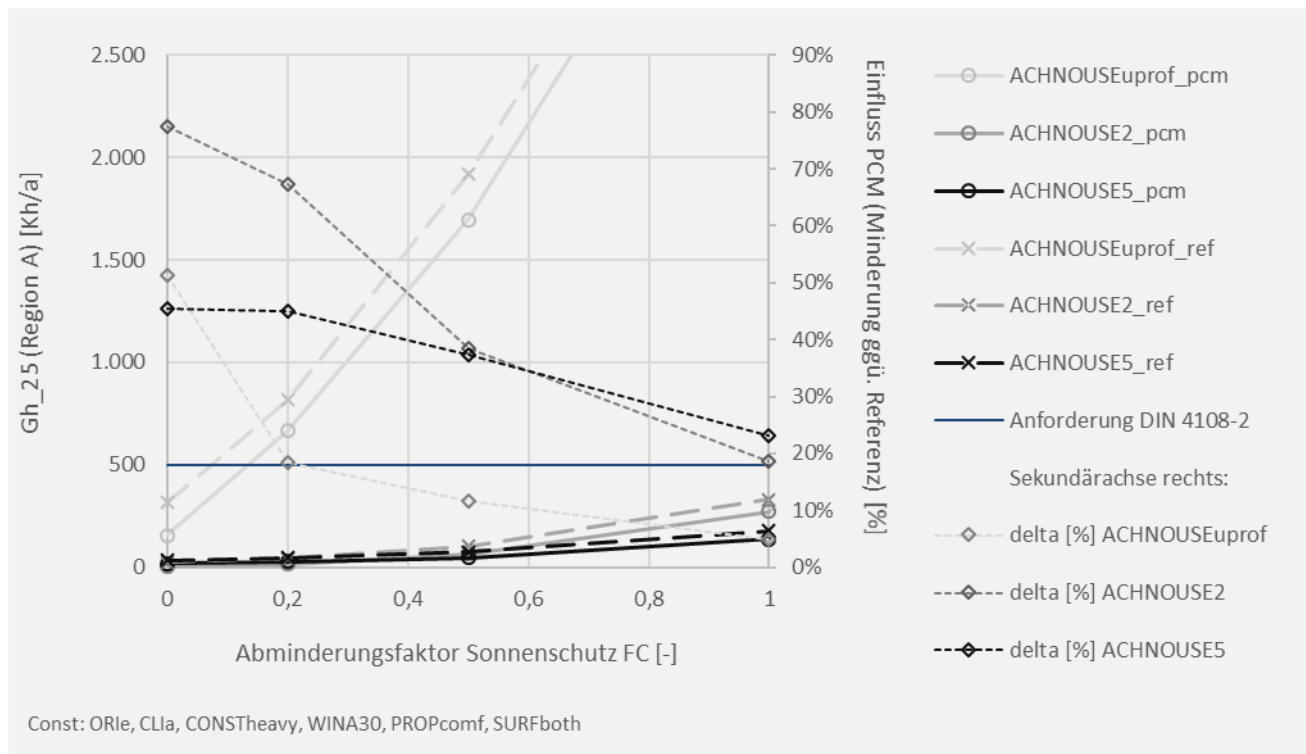


Bild 21: Simulationsergebnisse Bauplatte - Variation aller Parameter bis zum theoretischen Optimum.

Auf die weitere Untersuchung der Fälle mit ungünstigerer PCM-Belegung (nur eine Fläche Wand oder Decke, SURF) oder anderen PCM-Eigenschaften (PROP) kann daher verzichtet werden.

9.3.4 Gegenüberstellung Simulation und Sonneneintragskennwerte

Im Folgenden werden die Ergebnisse der zwei unterschiedlichen Nachweisverfahren - Simulation (Übertemperaturgradstunden) und vereinfachtes Verfahren (Sonneneintragskennwerte) - gegenübergestellt. Die grundlegenden Überlegungen zur Methodik dieser Auswertung wurden bereits in Abschnitt 9.2.1 vorgestellt.

In Bild 22 sind die Ergebnisse wieder für den mittleren Parametersatz dargestellt. Für die unterschiedlichen Fensterflächenanteil (Graustufen) ergeben sich die folgenden Interpretationen.

- Bei einem kleinen Fensterflächenanteil von **30 %** (WINA30, hellgrau, gepunktet, ganz unten) liegen die Werte der Über- bzw. Unterschreitung des zulässigen Sonneneintragskennwertes zwischen ca. -5 bis -15 %, also immer relativ sicher im zulässigen Bereich, auch wenn kein Sonnenschutz vorgesehen ist ($F_c = 1$). Die Übertemperaturgradstunden für den gleichen Fall ohne Einsatz von PCM (hellgrau, gestrichelt) liegen nur bis zu einem Sonnenschutz mit $F_c = 0,7$ unterhalb des Grenzwertes von 500 Kh/a. Bei gleichen Randbedingungen aber mit Einsatz von PCM (hellgrau, durchgezogen) können die Werte für alle F_c unter die Anforderungsgröße abgesenkt werden, kommen also dem Trend näher, welcher für die Sonneneintragskennwerte ermittelt wurde.
- Beim mittleren Fensterflächenanteil von **50 %** (nächste Graustufe) ergeben sich für die Sonneneintragskennwerte ebenfalls zulässige Werte, im Diagramm wird bei $F_c = 1$ knapp der Grenzwert erreicht (0 %). Die entsprechenden Simulationsergebnisse zeigen jedoch, dass die Fälle ohne und mit Einsatz von PCM jeweils schon bei ca. $F_c = 0,2$ bzw. $0,45$ die Anforderungslinie kreuzen.
- Für höhere Fensterflächenanteile von **70 % bis zu 100 %** ergeben sich beim Sonneneintragskennwert zulässige Werte bis zu $F_c = 0,6$ bzw. $0,4$, also mit Einsatz von außenliegendem Sonnenschutz durchaus realisierbar. Bei den Simulationsergebnissen dieser Fälle ergeben sich jedoch nur für den Fall WINA70 mit PCM gerade noch baubare F_c -Werte um $0,2$, alle anderen Fälle sind in dieser Parameterkombination nicht realisierbar.

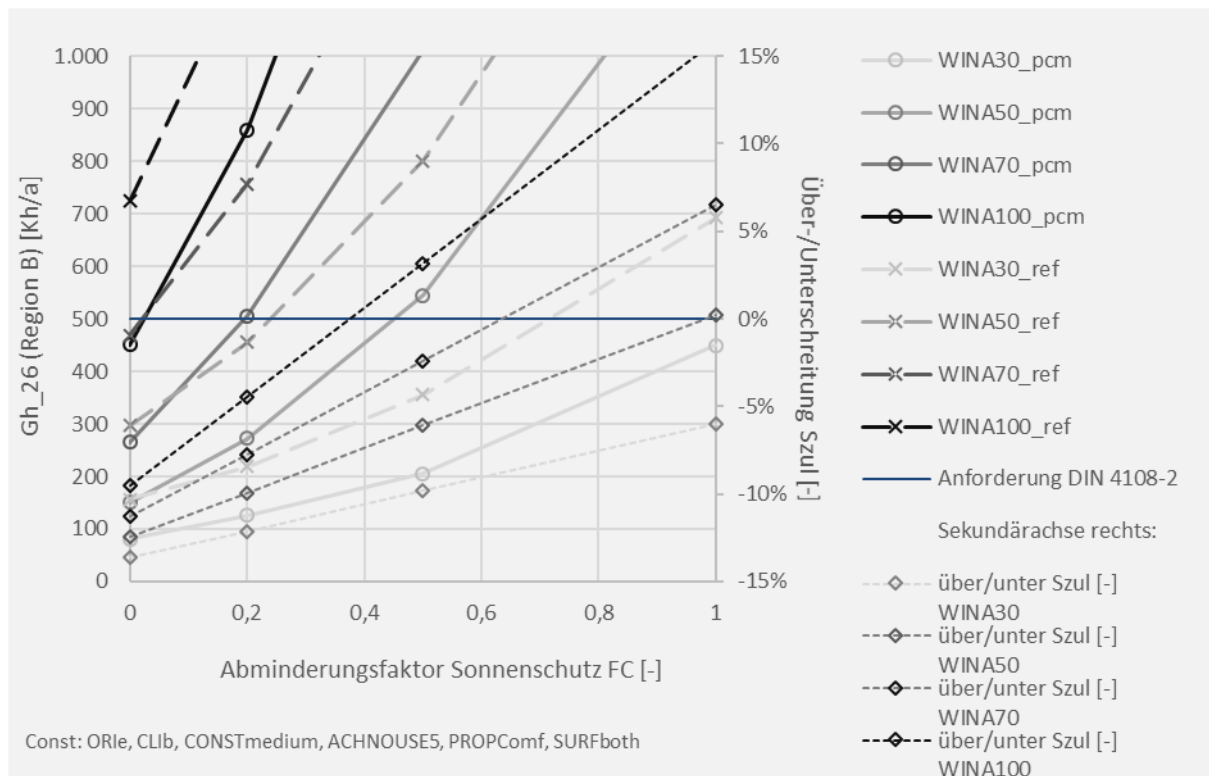


Bild 22: Simulationsergebnisse Bauplatte - Über-/Unterschreitung S_{zul} , mittlerer Parametersatz.

Die Auswertung der dargestellten Parametervariationen ergibt also eine sehr eingeschränkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse der beiden Berechnungsansätze, v.a. bezogen auf den Referenzfall ohne PCM (da nur dieser Fall in beiden Verfahren abgebildet werden kann).

Die Erfahrungen der Projektbeteiligten zeigen jedoch, dass für einfache Gebäudegeometrien durchaus Simulationsmodelle entwickelt werden können, deren Ergebnisse eine zumindest zufriedenstellende Übereinstimmung mit den Berechnungen auf Basis der Sonneneintragskennwerte erzielen können [12]. Dabei liegen jedoch die Ergebnisse des vereinfachten Verfahrens üblicherweise ungünstiger, als die der aufwändigeren Simulationsrechnungen, also "auf der sicheren Seite".

Im Rahmen der Bearbeitung des vorliegenden Projektes wurde dies erwartet, mindestens für den Referenzfall ohne PCM, konnte jedoch nicht erzielt werden. Die Modelle wurden dabei umfassend geprüft und untersucht, wobei einige Problemstellen identifiziert und gelöst bzw. entschärft werden konnten. Insgesamt konnten jedoch keine Modelle gefunden werden, welche für die Abbildung der Referenzfälle zufriedenstellende Ergebnisse liefern konnten.

Generell reagieren Simulationsmodelle v.a. bezogen auf den Sommerfall sehr sensibel auf unterschiedliche Randbedingungen, besonders beim Einsatz unterschiedlicher Simulationswerkzeuge.

Die über den Referenzfall hinausgehende Modellierung der PCM-Systeme führt zu einer weiteren Erhöhung der Komplexität und Sensibilität, wodurch der auf den Ergebnissen dieser Modelle basierenden Aussagen noch weniger Vertrauen geschenkt werden sollte.

Die Ausführungen zur Validierung der Modelle für die PCM-Systeme im Anhang (Abschnitt 17), zeigen zwar relativ zufriedenstellende Ergebnisse, die Modelle sind jedoch v.a. für die hybriden Systeme mit Lüftung und Kühldecke nicht sehr robust, bei dem rein baulichen System der Bauplatte zumindest schon länger eingeführt und etwas ausgereifter.

9.3.5 Erfahrungen mit dem Einsatz von Simulationsrechnungen für die Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes

Die erfahrenen Anwender, welche sich national und international mit der Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes beschäftigen, finden sich v.a. unter den Mitarbeitern der entsprechenden Normenkreise. Hier gibt es eine größere Schnittmenge mit dem Kreis der Bearbeiter des vorliegenden Projekts. Aus diesem Grunde kann auf umfassende Erfahrungen bei der Entwicklung und Anwendung der Verfahren zurückgegriffen werden.

Vor allem vor dem Hintergrund der letzten Überarbeitung der Normung (DIN 4108-2, adhoc-Gruppe sommerlicher Wärmeschutz) und der Novellierungen der rechtlichen Vorgaben (Nachweisführung, EnEV, GEG, Mindestwärmeschutz) zeigen die Erfahrungen und Erkenntnisse aus der Begleitung der Anwendung, dass in zunehmendem Maße ein dringender Überarbeitungsbedarf der Norm bezüglich des Einsatzes von Simulationen für den sommerlichen Wärmeschutz gegeben ist.

Hintergrund der Verschärfung der Problematik ist dabei, dass v.a. bei Nichtwohngebäuden eine Erbringung des Nachweises mit dem vereinfachten Verfahren oft nicht möglich ist. Daher nimmt der Einsatz von Simulationsrechnungen zur Nachweisführung zu, da damit eine differenzierter Abbildung der Gebäude möglich ist. Mit dieser Zunahme an Möglichkeiten, Einzeleinflüsse besser bewerten zu können, geht eine starke Zunahme an "Freiheitsgraden" einher, welche v.a. im Zusammenhang mit der öffentlich-rechtlichen Nachweisführung als problematisch anzusehen ist.

Eine Vielzahl wesentlicher, das sommerliche Wärmeverhalten von Räumen beeinflussender Randbedingungen wird zwar bereits durch den dafür vorgesehenen Abschnitt 8.4.2 in DIN 4108-2:2013-02 geregelt. Die Erfahrungen zeigen jedoch, dass die gegenwärtigen Formulierungen von "einheitlichen" Simulationsrandbedingungen nicht sicherstellen, dass verschiedene Anwender bei Einsatz unterschiedlicher Softwareanwendungen vergleichbare Ergebnisse erzielen.

Im Rahmen von innerhalb der adhoc-Gruppe zur DIN 4108-2 durchgeführten Ringrechnungen, bei denen unterschiedliche kommerzielle (IDA-ICE, WUFI-Plus,

ZUB-Helena-Sommer, TRNSYS) und nicht kommerzielle Softwareanwendungen zum Einsatz kamen, konnte gezeigt werden, dass selbst für einfachste Raumgeometrien deutlich unterschiedliche Übertemperaturgradstunden aus den Einzelberechnungen hervorgehen, obwohl in allen Fällen "augenscheinlich identische" Simulationsrandbedingungen nach DIN 4108-2 zugrunde gelegt waren. Als Ergebnis der durchgeführten Ringrechnungen konnten bereits einige wesentliche Gründe (nicht eindeutige Vorgabe der Lüftungsrandbedingungen, fehlende Angaben zur Berechnungszeitschrittlänge, fehlende Vorgaben bezüglich der Rundung von berechneten Temperaturen, Sommerzeit/Winterzeit...) für die festgestellten Abweichungen identifiziert werden.

Weiterhin zeigen unterschiedliche Modelle von vermeintlich gleichen Parameterkombinationen z.T. erhebliche Abweichungen und bedürfen der weiteren Untersuchung. Im Rahmen des vorliegenden Projektes kann diese Problematik nur identifiziert aber nicht bearbeitet werden.

Die hier aufgeführten Probleme und Begrenzungen der Anwendbarkeit beziehen sich auf den Referenzfall. Für die PCM-Modelle liegen darüber hinaus z.T. wenige Erfahrungen bei der Abbildung in Simulationsmodellen vor, v.a. bezüglich der Regelung. Diese Unsicherheiten bei der Modellierung der PCM-Systeme und die damit zu erwartenden Einschränkungen der Vertrauenswürdigkeit der Ergebnisse verschärfen somit die Schwierigkeiten noch weiter.

9.3.6 Fazit zur Nutzbarkeit der Ergebnisse der Simulationsrechnungen für die Entwicklung neuer Berechnungsansätze

Die dargestellten Berechnungsergebnisse und die identifizierten Probleme lassen es aus Sicht des bearbeitenden Konsortiums nicht zu, auf dieser Grundlage neue Ansätze für die Quantifizierung des erzielbaren Effektes durch Einsatz von PCM-Systemen zu entwickeln. Die Untersuchungen des Referenzfalls ohne PCM zeigen schon so große Abweichungen, dass der Einfluss durch die PCM-Systeme nicht sauber abgebildet werden kann.

Deshalb sollte vor der Implementierung von Berechnungsvorschriften zur Berücksichtigung einer PCM-Wirkung eine grundsätzliche und umfassende Untersuchung zur Anwendung unterschiedlicher Softwareanwendungen für die thermische Gebäudesimulation für den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes erfolgen. Erst wenn Referenzfälle hinreichend gut und reproduzierbar berechenbar sind, macht eine Ableitung von Vorschriften zur Berücksichtigung weitergehender Effekte, wie z.B. die Wirkung von PCM, Sinn.

9.4 Bauplatte - Nutzenergie Kühlen DIN V 18599

Zur Wahl der variierten und konstant gehaltenen Parameter siehe einführende Erläuterungen zur Behandlung des sommerlichen Wärmeschutzes im vorherigen Abschnitt.

9.4.1 Vorbemerkung zur Behandlung der Lüftung in DIN V 18599

Die Auswertungen der Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes zeigen, dass mittels passiver Systeme kaum sichergestellt werden kann, eine Überhitzung im Sommer auszuschließen, wenn nicht gleichzeitig auch der Tag- und/oder Nachtluftwechsel erhöht wird.

Wie die Ausführungen im Abschnitt 9.6.3 für das System der Lüftungsanlagen zeigen, wurden allgemeine Probleme bei der Behandlung der Lüftung in DIN V 18599 identifiziert, v.a. für die Nutzenergie im Kühlfall. Zudem sieht das Verfahren der DIN V 18599 eine Erhöhung des Luftwechsels im Tagesgang nicht vor, da ein entsprechender Berechnungsansatz fehlt und die Norm prinzipiell nur von Tagesmittelwerten ausgeht.

Auf Grundlage dieser Vorüberlegungen ist der Versuch einer Quantifizierung des möglichen PCM-Potentials für die Bestimmung der Nutzenergie eigentlich obsolet, wenn schon der Effekt durch Erhöhung des Tag- und/oder Nachtluftwechsels im Verfahren nicht abbildbar ist, welcher im Sommerfall absolut gesehen i.d.R. größer ist.

9.4.2 Vergleichbarkeit Simulation und normative Berechnung - ohne PCM

Die Ergebnisse der Berechnungen der Nutzenergie Kühlen für die zwei unterschiedlichen Berechnungsansätze - Simulation und der Tages-/Monatsbilanz nach DIN V 18599 - sind für einen mittleren Parametersatz in Bild 23 dargestellt.

In den Diagrammen sind jeweils unterschiedliche Fensterflächenanteile variiert (Graustufen), zwischen den Diagrammen ist die **Gebäudeschwere** variiert, d.h. leicht (oben links), mittel (oben rechts) und schwer (unten). Die durchgezogenen Linien verbinden die Werte für die Simulation, die gestrichelten Linien die für die normativen Berechnungen. Aufgetragen auf der rechten Ordinate sind die prozentualen Abweichungen zwischen diesen Werten (Simulation gegenüber Berechnung) mit einer gepunkteten Linie verbunden.

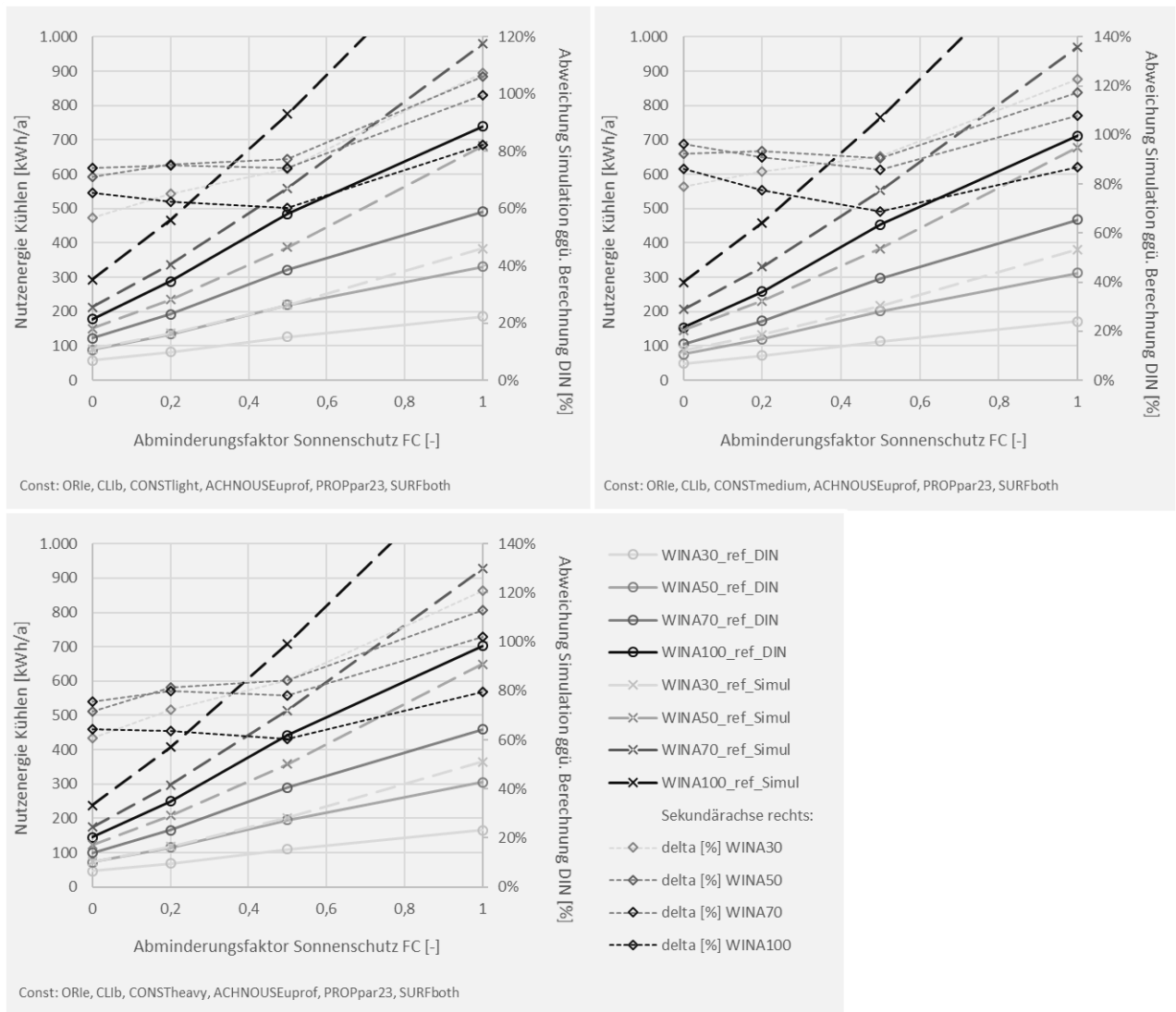


Bild 23: Bauplatte - Nutzenergie Kühlen ohne PCM - Simulation vs. DIN V 18599 - Orientierung Ost. Einfluss Gebäudeschwere (CONST): leicht (oben links), mittel (oben rechts), schwer (unten)

Nach dem Verständnis des Normungskreises sollten idealerweise die Werte der (einfacheren) normativen Berechnungen über den Werten der (detaillierten) Simulationen liegen, also auf der sicheren Seite.

Bei den in Bild 23 dargestellten Ergebnissen liegen jedoch die Simulationen durchweg über den Werten, die sich aus der normativen Berechnung ergeben.

Die **höchsten** Abweichungen ergeben sich für die mittlere und schwere Bauweise, kleine Fensterflächenanteile und ohne Sonnenschutz ($F_c = 1$), d.h. bis ca. 120 %, also bei mehr als dem Doppelten des Wertes aus der DIN-Berechnung. Die **geringsten Abweichungen** stellen sich ein, wenn leichte Bauweise, Vollverglasung (Fensterflächenanteil = 100 %) und mittlerer Sonnenschutz (F_c bis 0,5) zusammen kommen.

Wird statt der Ost- die West- oder **Südorientierung** betrachtet, so erhöhen sich die größten Abweichungen auf über 200 %, siehe Bild 24.

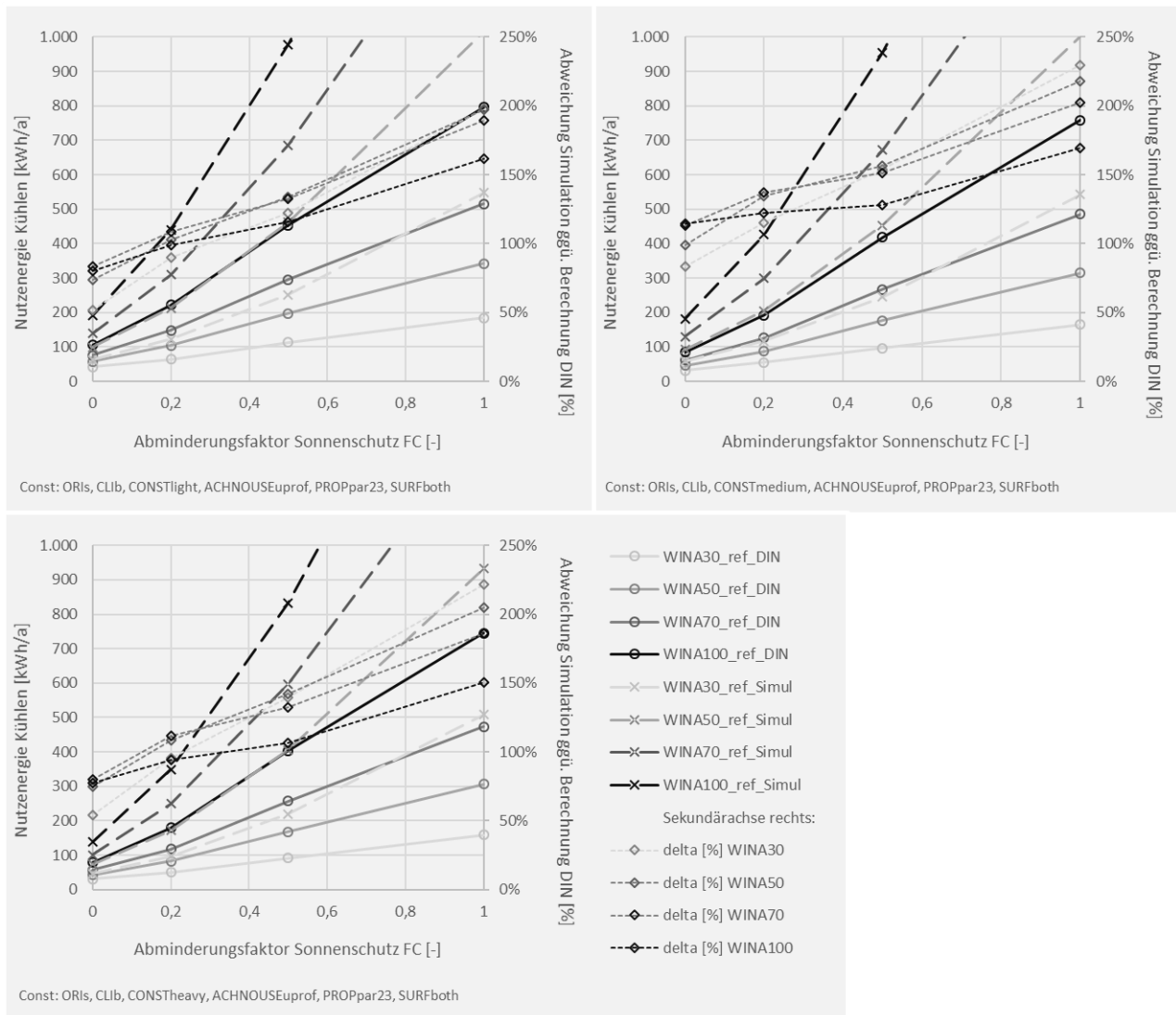


Bild 24: Wie Bild 23, Orientierung Süd statt Ost.

Eine Änderung der **Klimaregion** ist für die Berechnung der Nutzenergie nicht relevant, da hier v.a. im Rahmen der Nachweisführung immer ein mittleres Klima (Potsdam, Region B) zugrunde gelegt wird. Die Ergebnisse zeigen ebenfalls keine wesentlichen Auswirkungen auf die Bewertung der Vergleichbarkeit beider Berechnungsverfahren.

9.4.3 Vergleich mit/ohne PCM (Simulation) - Einfluss Gebäudeschwere - mittlerer Parametersatz

Bei der Behandlung des sommerlichen Wärmeschutzes ergeben sich die günstigsten Werte (bezüglich der Senkung der Übertemperaturgradstunden) bei der Wahl des PCM mit den **Eigenschaften** des Comfortbords, welche auf Messwerten beruhen und auf deren Basis die Kalibrierung der Kühldecke erfolgte, siehe

Abschnitt 17.2. Bei den vorliegenden Simulationen der Nutzenergie im Kühlfall zeigen sich die günstigsten Eigenschaften für die (virtuelle) Platte mit Paraffin und den Erstarrungs- und Schmelzpunkten von 24 bzw. 25 °C (**PROPar25**). Allerdings sind die Unterschiede angesichts des geringen PCM-Einflusses nicht übermäßig ausgeprägt.

In Bild 25 sind die Ergebnisse der Simulation für die drei verschiedenen Gebäudeschweren dargestellt. Der Einfluss des PCM gegenüber dem Referenzfall ohne PCM ist wieder auf der rechten Ordinate aufgetragen, in [%].

Erwartungsgemäß ergibt sich der **größte Einfluss** (bis über 35 %) bei der **leichten** Bauweise und beim (theoretischen) Grenzfall ohne Sonneneinstrahlung ($F_c = 0$, bei aktiviertem Sonnenschutz), wobei die unterschiedlichen Fensterflächenanteil keine große Rolle spielen und erst bei der schweren Bauweise Unterschiede erkennen lassen. Die Interpretation der Werte lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Bei Sonnenschutz $F_c \geq 0,2$ liegt der PCM-Einfluss für die **leichte** Bauweise bei ca. 23 % bis zu ca. 15 % im Fall ohne Sonnenschutz.
- Bei **mittlerer** Bauweise senkt sich dies auf ca. 14 bis 7 % ab.
- Für die **schwere** Bauweise liegen die Werte zwischen 15 % (WINA30, FC20) bis 2,5 % (WINA100, FC100).

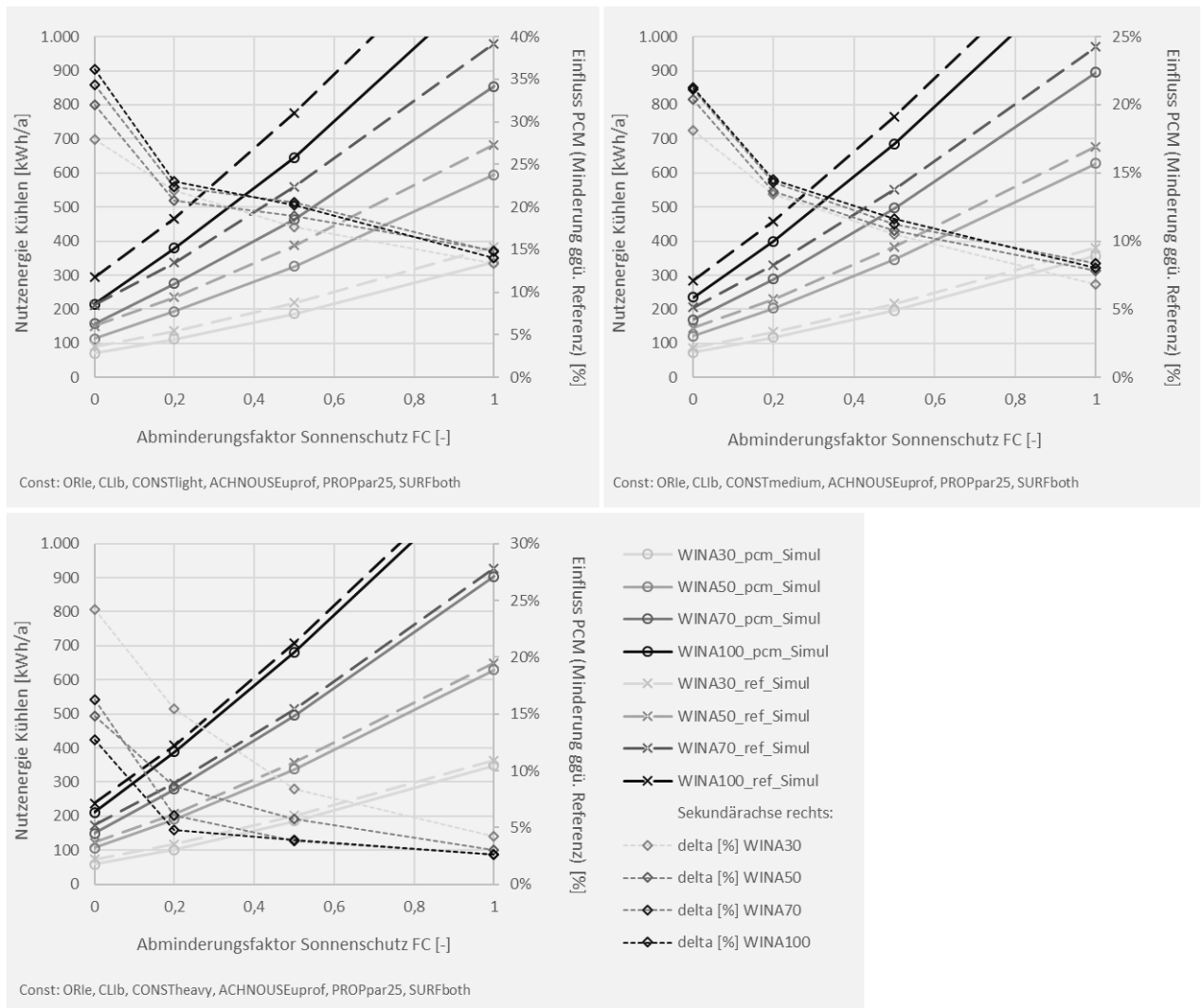


Bild 25: Simulationsergebnisse Bauplatte - Einfluss Gebäudeschwere (CONST): leicht (oben links), mittel (oben rechts), schwer (unten)

9.4.4 Vergleich mit/ohne PCM (Simulation) - Einfluss Orientierung

In Bild 26 sind die Simulationsergebnisse für den Fall Orientierung **Süd** dargestellt, die Ergebnisse für West ähneln denen für Ost, liegen aber etwas höher.

Analog zur Orientierung Ost lässt sich die Interpretation der Werte wie folgt zusammenfassen:

- Bei Sonnenschutz $F_c > 0,2$ liegt der PCM-Einfluss für die **leichte** Bauweise bei ca. 35 % bis zu ca. 12 % im Fall ohne Sonnenschutz.
- Bei **mittlerer** Bauweise senkt sich dies auf ca. 22 bis 7 % ab.
- Für die **schwere** Bauweise liegen die Werte zwischen 18 % (WINA30, FC20) bis 2 % (WINA100, FC100).

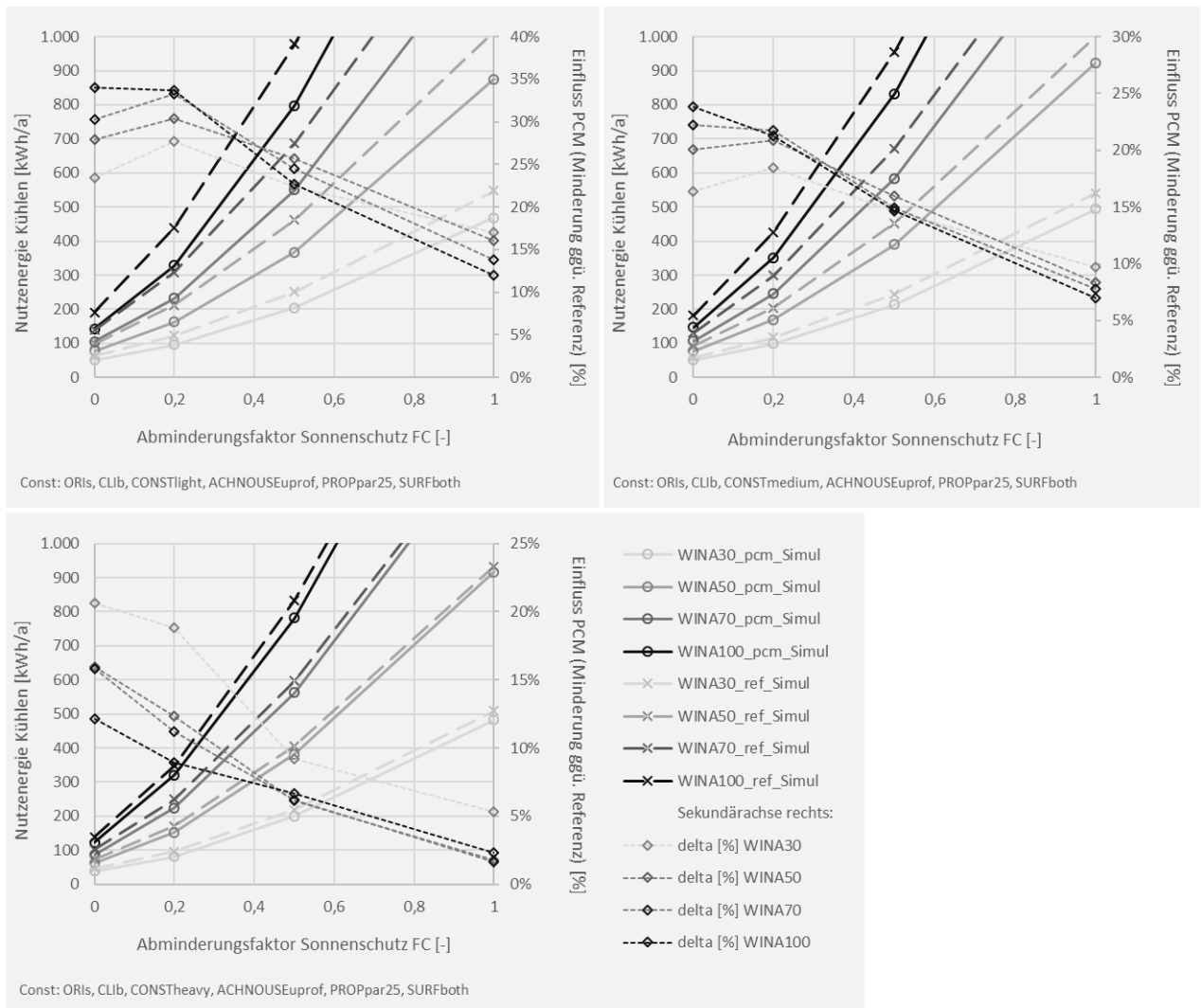


Bild 26: Wie Bild 25, Orientierung Süd statt Ost.

9.4.5 Vergleich Simulation und normative Berechnung - mit PCM - neuer Ansatz für DIN V 18599

Wie in Abschnitt 9.4.1 gezeigt ist die **Vergleichbarkeit** der Simulationsrechnungen und der normativen Berechnung für den Referenzfall ohne PCM aus zwei Gründen **nicht gegeben**, da

- die Werte mit Abweichungen zwischen 60 und bis 200 % stark differieren und
- darüber hinaus die Werte nach DIN nicht auf der sicheren Seite also über den Ergebnissen der Simulation liegen, sondern darunter.

Damit fehlt die wesentliche Voraussetzung, auf einer sicheren Basis einen Berechnungsansatz für den Einsatz von PCM zu entwickeln, welcher dem Verfahren der DIN erlaubt, den Einfluss in ähnlicher Weise quantifizieren zu können, wie die Simulationsrechnungen es erlauben.

Dennoch soll hier dargestellt werden, welche Möglichkeiten bestehen, die gewählte Methodik weiter zu verfolgen, und diese auf einen beispielhaft gewählten Ansatz anzuwenden.

Einer der einfachsten Ansätze wäre eine **Anpassung der Klassifizierung der Gebäudeschwere**, d.h. bei Einsatz von PCM-Systemen und unter Wahrung gewisser Mindest-Anforderung an diese System und deren Eigenschaften kann vereinfacht angenommen werden, dass für die Berechnung nach DIN V 18599

- bei leichter eine mittlere Bauweise bzw.
- bei mittlerer ein schwere Bauweise

in Ansatz gebracht werden darf. Ein analoger Ansatz wäre auch für das vereinfachte Verfahren nach DIN 4108-2 für den sommerlichen Wärmeschutz denkbar.

In Bild 27 sind die Ergebnisse in Form der Gegenüberstellung Simulation/DIN für diesen Ansatz mit PCM dargestellt (oben). Zum Vergleich ist die bereits beschriebene Gegenüberstellung für den Referenzfall ohne PCM ebenfalls aufgeführt (unten).

Beide Diagramme weisen die gleiche Skalierung sowohl auf der linken als auch auf der rechten Ordinate auf.

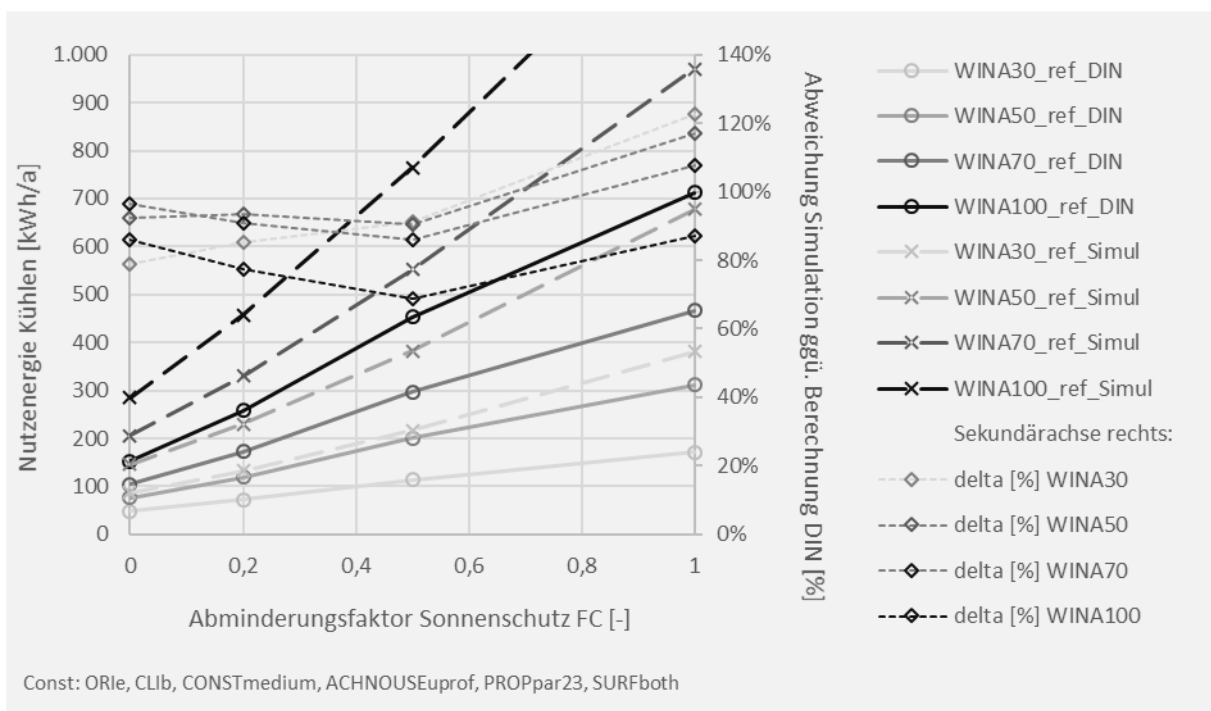
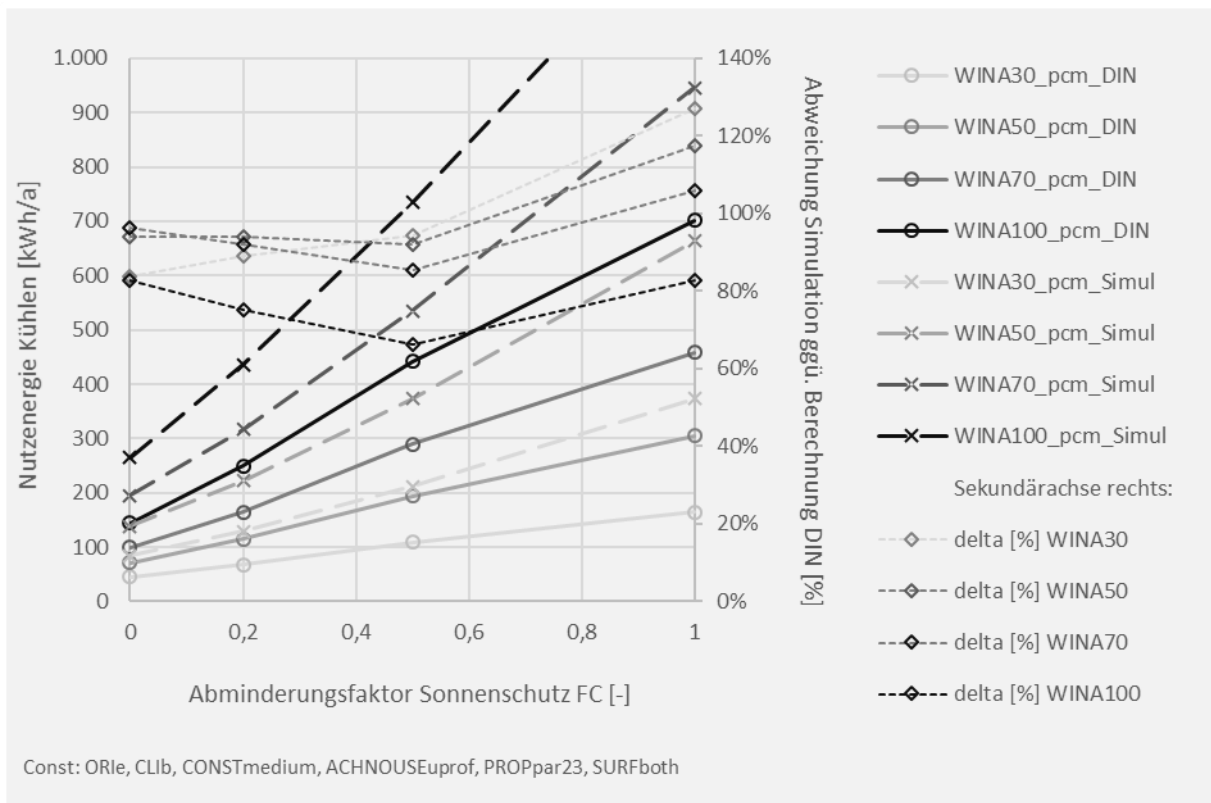


Bild 27: Bauplatte - Nutzenergie Kühlen - Simulation vs. DIN V 18599 - Fall mit PCM und neuem Ansatz (oben), Fall ohne PCM (ref, unten)

Es ergeben sich nicht erwartete Analogien für den gewählten einfachen Ansatz, die Klassifizierung der Gebäudeschwere anzupassen, sowohl bei den sich einstellenden absoluten Berechnungswerten sowie bei den relativen Abweichungen der zwei Berechnungsverfahren für die beiden Fälle mit (oben) und ohne (unten) PCM.

In den Diagrammen sind die Werte für die **mittelschwere** Bauweise dargestellt, für die **leichte** Bauweise ergeben sich Werte, die ähnlich nah beieinander liegen. Für die **schwere** Bauweise entfällt diese Betrachtung, da der Ansatz (Zuordnung der nächst-schwereren Bauweise) nicht möglich ist.

In Bild 28 sind nur die **Abweichungen** Simulation gegenüber DIN V 18599 dargestellt, diesmal auf der Primärachse links, für den Fall mit PCM (Linie durchgezogen) und ohne PCM (ref, gestrichelt).

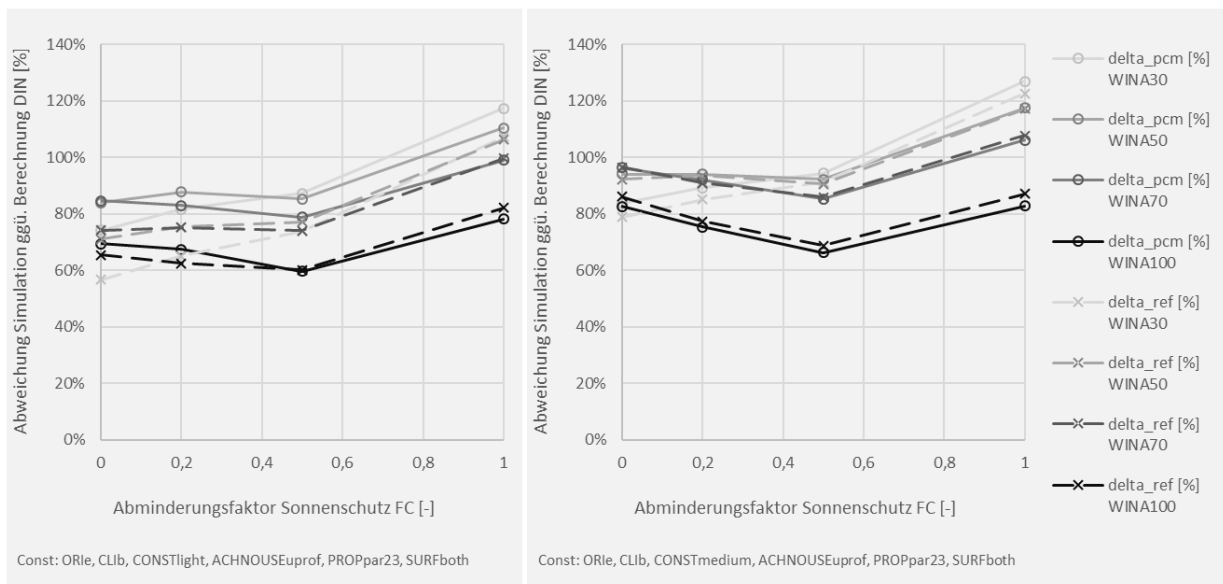


Bild 28: Bauplatte - Nutzenergie Kühlen - Abweichung Simulation gegenüber DIN V 18599 - Bauweise leicht (links) und mittel (rechts)

In Tabelle 26 sind die entsprechenden prozentualen **Abweichungen** zwischen den Verfahren für beide Bauweisen tabellarisch aufgetragen, für F_c -Werte von 0,2 bis 1, wobei die Werte mit PCM oben und ohne PCM unten tabelliert sind.

Tabelle 26: Vergleich Simulation und Berechnung DIN V 18599 (Abweichung ggü. DIN). Mit PCM (oben) und ohne PCM (unten).

Bauweise	leicht			mittel		
	CONSTlight			CONSTmedium		
	$F_c = 0,2$	$F_c = 0,5$	$F_c = 1$	$F_c = 0,2$	$F_c = 0,5$	$F_c = 1$
Fensterflächen- anteil	Abweichung Simulation ggü. Berechnung DIN - mit PCM					
WINA30	82%	87%	117%	89%	94%	127%
WINA50	88%	85%	110%	94%	92%	117%
WINA70	83%	79%	99%	92%	85%	106%
WINA100	67%	60%	78%	75%	66%	83%
	Abweichung Simulation ggü. Berechnung DIN - ohne PCM					
WINA30	65%	74%	107%	85%	91%	123%
WINA50	75%	77%	106%	94%	91%	117%
WINA70	75%	74%	100%	91%	86%	108%
WINA100	62%	60%	82%	77%	69%	87%

Const: ORle, CLib, ACHNOUSEuprof, PROPpar23, SURFboth

Tabelle 27 enthält die zugehörigen Werte für die **Quantifizierung des PCM-Einflusses**, also die mögliche Minderung (im Kühlfall = Verbesserung), welche durch den Einsatz von PCM erreicht werden kann.

Es zeigt sich, dass die durch die Simulationen gefundenen Werte für die Quantifizierung des PCM-Einflusses durchaus durch Berechnung nach DIN V 18599 im Kombination mit dem gewählten einfachen Bewertungsansatz für die PCM-Bauplatte nachgebildet werden können, also in der Tendenz ähnliche Aussagen getroffen werden können.

Tabelle 27: Einfluss PCM (Minderung ggü. Referenz) für Bereich $F_C = 0,2$ bis 1. Berechnung nach DIN mit neuem Ansatz (oben) bzw. Simulation (unten)

Bauweise	leicht			mittel		
	CONSTlight			CONSTmedium		
	$F_C = 0,2$	$F_C = 0,5$	$F_C = 1$	$F_C = 0,2$	$F_C = 0,5$	$F_C = 1$
Fensterflächen- anteil	Minderung Fall mit PCM ggü. Referenz - DIN					
WINA30	15%	11%	8%	5%	4%	4%
WINA50	12%	9%	6%	4%	3%	2%
WINA70	11%	8%	5%	5%	3%	2%
WINA100	11%	7%	4%	4%	3%	1%
	Minderung Fall mit PCM ggü. Referenz - Simulation					
WINA30	22%	18%	13%	13%	11%	7%
WINA50	21%	19%	15%	14%	11%	8%
WINA70	22%	21%	15%	14%	11%	8%
WINA100	23%	20%	14%	15%	12%	8%

Const: ORle, CLib, ACHNOUSEuprof, PROPPar23, SURFboth

In Bild 29 sind diese Tabellenwerte graphisch dargestellt, d.h. der Einfluss des Einsatzes von PCM gegenüber dem Fall ohne (Referenz), aufgetragen auf der Primärachse links für die leichte (links) und mittlere Bauweise (rechts).

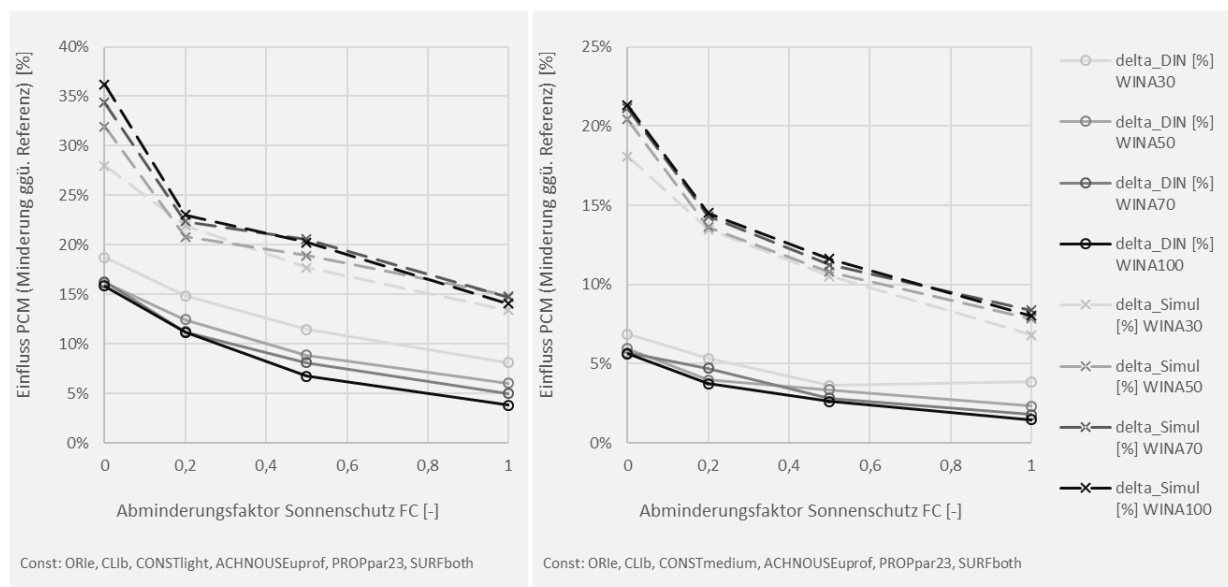


Bild 29: Bauplatte - Nutzenergie Kühlen - Abweichung Simulation gegenüber DIN V 18599 - Bauweise leicht (links) und mittel (rechts)

9.5 Lüftungsanlage - sommerlicher Wärmeschutz DIN 4108-2

Die Beschreibung der Randbedingungen und Ergebnisse für die **Lüftungsanlage** baut auf den Ausführungen auf, welche sich auf die **Bauplatte** im vorhergehenden Abschnitt beziehen. Bei den Randbedingungen werden also nur diejenigen aufgeführt, bei denen sich Änderung gegenüber dem System mit der Bauplatte ergeben.

In den hier aufgeführten Ergebnisdarstellungen sind folgende Parameter konstant gehalten und werden daher nicht explizit aufgeführt:

- SYSventilation - System Lüftungsanlage
- VENTsupexh - mechanische Lüftung Zu-/Abluftanlage (systembedingt)
- AMO2 - Belegung bzw. Menge PCM gemäß definierter Variante 2 , siehe Ausführungen in 9.1.

Die Ergebnisdarstellung orientiert sich ebenfalls an den bereits beschriebenen graphischen Darstellungen für die Bauplatte und führt diese weiter.

9.5.1 Einfluss Gebäudeschwere - mittlerer Parametersatz

Die Ergebnisse für die drei Klassen der **Gebäudeschwere** (CONSTlight, medium, heavy) sind in Bild 30 getrennt aufgetragen. Variiert wurde

- der **Sonnenschutz** (Abminderungsfaktor F_c), aufgetragen auf der Abszisse,
- der **Fensterflächenanteil** (WINA), repräsentiert durch die verschiedenen Graustufen, sowie
- die Unterscheidung der Fälle **mit und ohne PCM**, d.h. Linie durchgezogen oder gestrichelt.

Die **Skalierung** der primären (links) Ordinate, auf der die Übertemperaturgradstunden G_{hx} aufgetragen sind, entspricht in der Begrenzung nach oben den Darstellungen der Bauplatte, d.h. 2.000 Kh/a bei einem Grenzwert von 500 Kh/a (gemäß DIN 4108-2 für Nichtwohngebäude). Daher sind Teile der Werte v.a. für größere Fensterflächenanteile nicht dargestellt, da außerhalb der Skalierungs-Grenzen. Für die Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes ist der Bereich um den Anforderungswert von höherer Relevanz, durch die Darstellung kann somit auf diesen fokussiert werden.

Die Interpretation der Ergebnisse erfolgt zweistufig, zunächst bezogen auf die absoluten Werte der Übertemperaturgradstunden, anschließend mittels der relativen Änderung des Falles mit PCM gegenüber dem Referenzfall ohne. Es

konnten nicht alle Fälle abgedeckt werden, daher sind bei der Darstellung der Datenpunkte einige Lücken.

Insgesamt ergeben sich für die **absoluten Werte der Übertemperaturgradstunden** bei Fensterflächenanteilen $\geq 50\%$ und für die Fälle ohne oder mit innenliegendem Sonnenschutz ($F_C > 0,5$) keine Konstellationen, welche sich im Rahmen der Einhaltung der Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz bewegen. Die meisten der mittels der Simulationen bestimmten Werte liegen außerhalb des dargestellten Wertebereichs, d.h. (beispielhaft): im Extremfall (leichte Bauweise, 100 % Fensterflächenanteil, kein Sonnenschutz) bei ca. 17.000 Kh/a, beim gleichen Fall jedoch mit Sonnenschutz $F_C = 0,5$ bei 4.750 Kh/a und bei gleichem Sonnenschutz aber schwerer Bauweise noch bei 2.700 Kh/a.

Die sich ergebenden **relativen Veränderungen** zwischen den Fällen mit und ohne PCM sind nicht klar einschätzbar, da obwohl die entsprechenden Linien (durchgezogen und gestrichelt) recht nahe beieinander liegen, sich jedoch einige "Ausreißer" einstellen. Für den Grenzfall $F_C = 0$ sind die absolute Werte nahe 0 womit sich z.T. große Werte für die relative Minderung ergeben. Bei einem Fensterflächenanteil von 30 % ergeben sich für die mittlere und schwere Bauweise bei $F_C = 0,5$ sehr kleine Absolutwerte (40 .. 250 Kh/a) mit sehr großen relativen Änderungen (-105 .. -390 %).

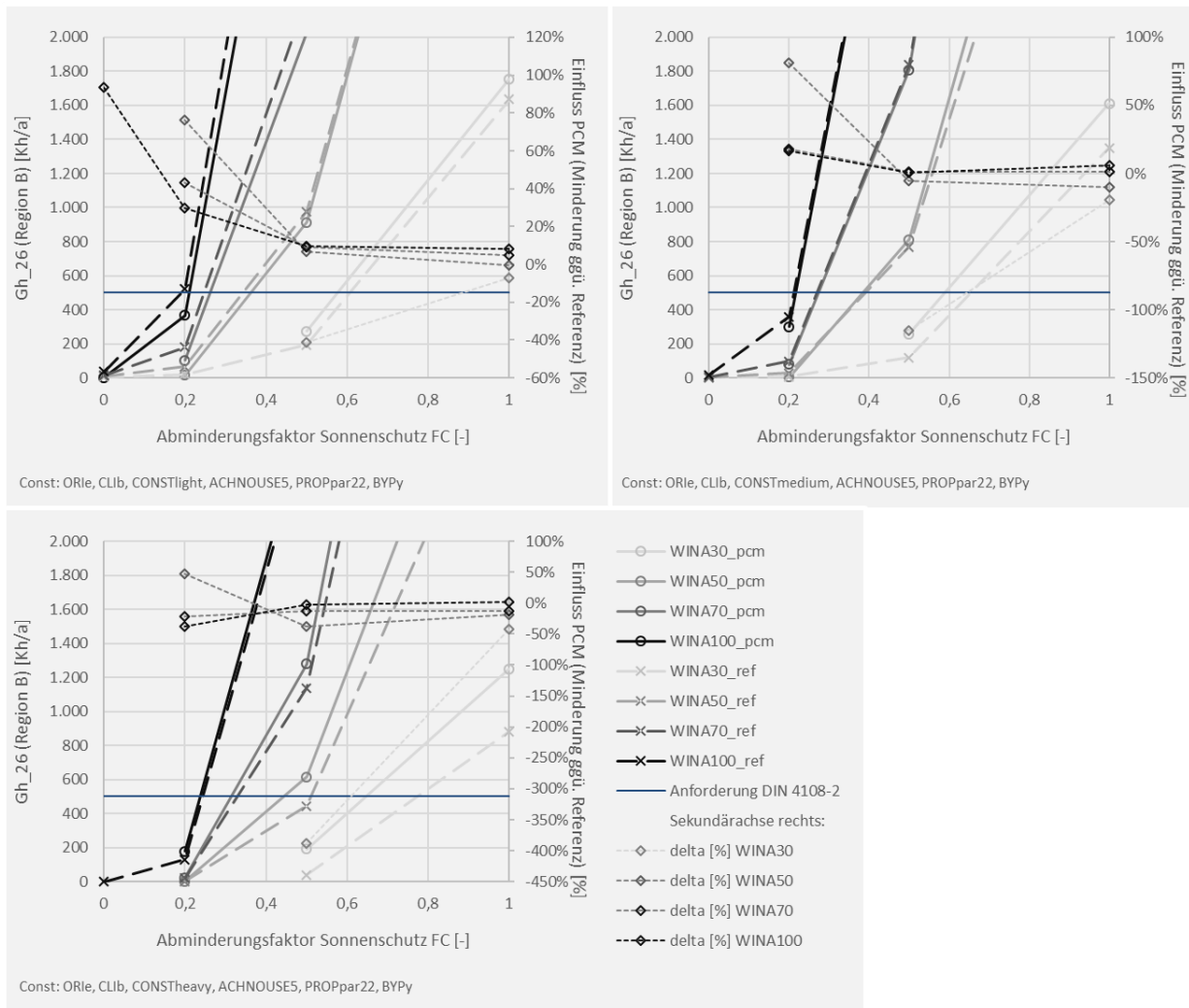


Bild 30: Simulationsergebnisse Lüftungsanlage - Einfluss Gebäudeschwere (CONST): leicht (oben links), mittel (oben rechts), schwer (unten)

Zur besseren Einschätzung der Größenordnung der **absoluten Werte** sind in Bild 31 nicht die Übertemperaturgradstunden Gh_x sondern - ohne "grad" - die **Übertemperaturstunden** n_x in [h/a] dargestellt, also ohne die zusätzliche Dimension der Temperatur. Für die Büronutzung ergibt sich ein theoretisch möglicher Maximalwert von 2.868 h/a (Nutzungszeit 11 h/d bei 5 Tagen pro Woche). Der zulässige Grenzwert (der aber für die Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes nicht herangezogen wird) liegt gemäß DIN 4108-2 bei 10 % dieser Zeit, im Diagramm als horizontale blaue Linie eingetragen.

Für die in den Diagrammen dargestellten Werte bedeutet dies, dass bei Übertemperaturstunden von ca. 1.400 h/a für die Hälfte der jährlichen Nutzungszeit unzulässig erhöhte Innenraumtemperaturen vorliegen. Die Werte erscheinen daher insgesamt zu hoch und werden als nicht ausreichend vertrauenswürdig angesehen.

Die den Berechnungen zugrunde liegenden Simulationsmodelle wurden verschiedenen Prüfungen unterzogen, welche Aufschluss darüber geben sollen, warum sich diese unseres Erachtens wenig plausiblen Werte ergeben. Die hier dargestellten Berechnungsergebnisse stellen jedoch schon die Werte dar, welche nach möglicher Optimierung der Modelle erzielbar sind.

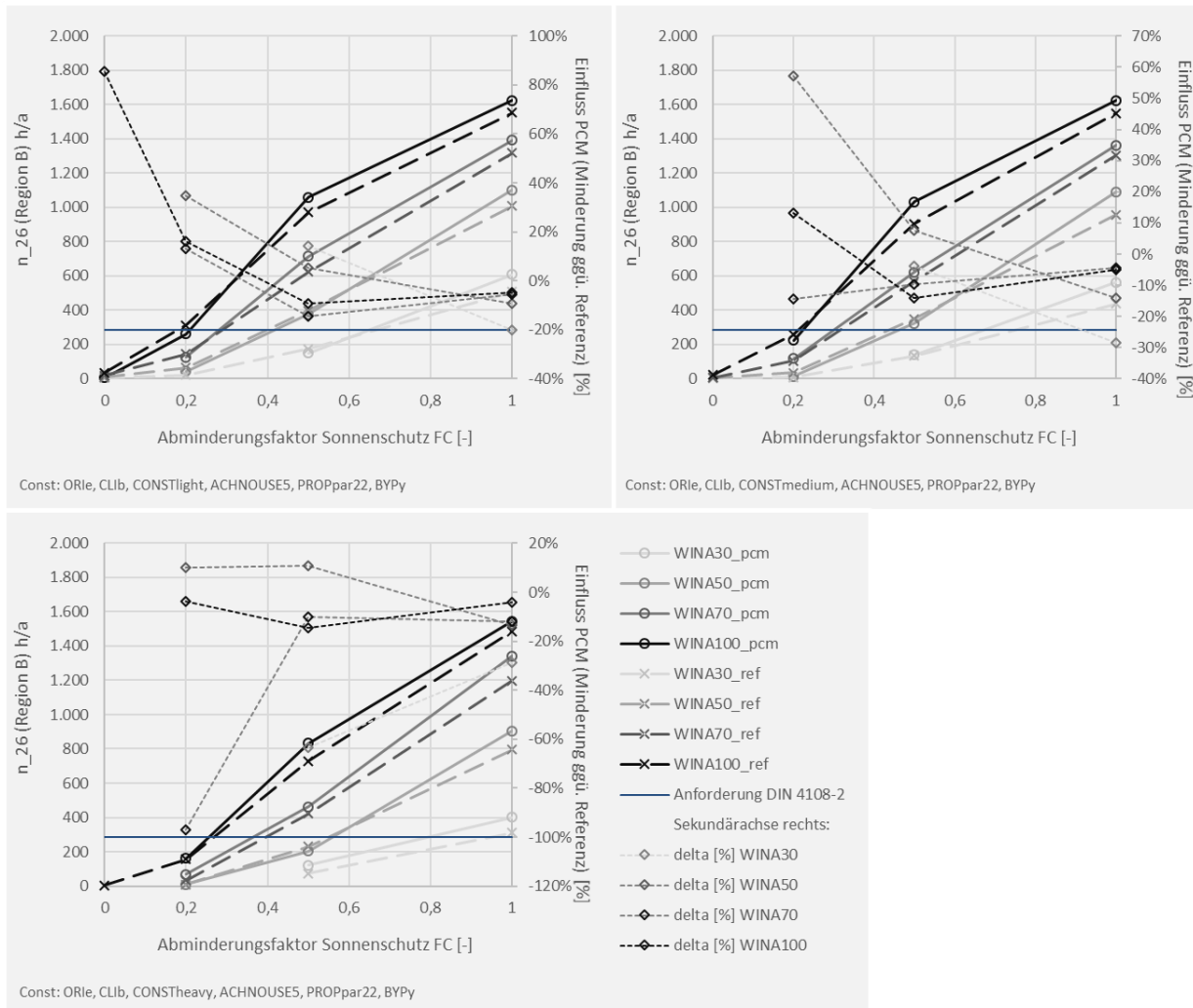


Bild 31: Wie Bild 30, jedoch Übertemperaturstunden n_x statt Übertemperaturgradstunden Gh_x .

9.5.2 Fazit zur Nutzbarkeit der Ergebnisse der Simulationsrechnungen für die Entwicklung neuer Berechnungsansätze

Die dargestellten Berechnungsergebnisse und die identifizierten Probleme lassen es aus Sicht des bearbeitenden Konsortiums nicht zu, auf dieser Grundlage neue Ansätze für die Quantifizierung des erzielbaren Effektes durch Einsatz von PCM-Systemen zu entwickeln. Die Untersuchungen des Referenzfalls ohne PCM zeigen schon so große Abweichungen, dass der Einfluss durch die PCM-Systeme nicht sauber abgebildet werden kann.

9.6 Lüftungsanlage - Nutzenergie Kühlen DIN V 18599

Zur Wahl der variierten und konstant gehaltenen Parameter siehe einführende Erläuterungen zur Behandlung des sommerlichen Wärmeschutzes im vorherigen Abschnitt.

9.6.1 Vergleichbarkeit Simulation und normative Berechnung - ohne PCM

In Bild 32 sind - wie beim System Bauplatte bereits beschrieben - die Ergebnisse für die Nutzenergie Kühlen für das System mit Lüftungsanlage aufgetragen. Dabei wird wieder ein mittlerer Parametersatz zugrunde gelegt und die drei Diagramme stellen die drei Stufen der Gebäudeschwere dar, wobei jeweils der Sonnenschutz sowie die Fensterflächenanteile variiert sind.

Die beiden gegenübergestellten Fälle sind die **Berechnung** nach DIN V 18599 (durchgezogene Linie) sowie die Ergebnisse der thermischen **Simulation** (gestrichelt) - jeweils der Referenzfall ohne PCM. Die Abweichungen der Simulation gegenüber der Berechnung nach DIN sind als relative Werte prozentual auf der Sekundärachse aufgetragen.

Die Datenpunkte in den Diagrammen zeigen klar erkennbare **Abweichungen** für den Nutzkältebedarf zwischen Simulation und Berechnung nach DIN V 18599. Die Abweichungen liegen zwischen -50 % (kleine Fensterflächenteile, kaum Strahlungsdurchgang) bis +170 % (große Fensterflächenanteile, Vollverglasung, ohne Sonnenschutz, schwere Bauweise).

Darüber hinaus gibt es bei den Abweichungen einen "Nulldurchgang", d.h. die Ergebnisse der Simulation liegen mal unter und in der Mehrheit der Fälle über den Ergebnissen der Norm-Berechnung, es kann also kein eindeutiger Trend abgeleitet werden. Diese Ergebnisse erfordern daher eine generelle Betrachtung der Behandlung der mechanischen Lüftung im Kühlfall im Berechnungsansatz der DIN V 18599.

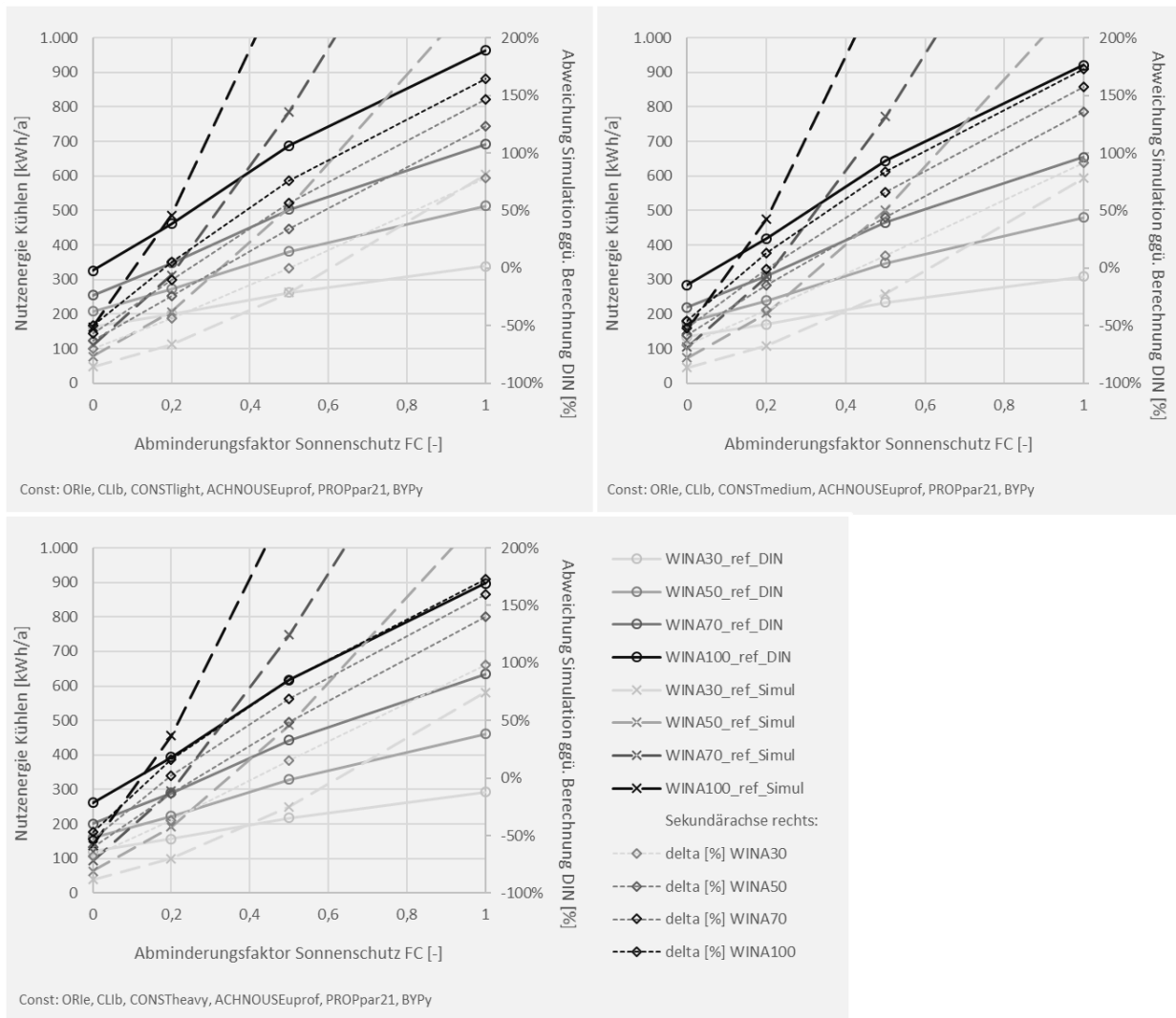


Bild 32: Lüftungsanlage - Nutzenergie Kühlen ohne PCM - Simulation vs. DIN V 18599 - Orientierung Ost. Einfluss Gebäudeschwere (CONST): leicht (oben links), mittel (oben rechts), schwer (unten)

9.6.2 Berechnung Nutzkältebedarf gem. DIN V 18599 bei Einsatz mechanischer Lüftung

Die Ergebnisse für die Nutzenergie gemäß DIN V 18599 zeigen, dass sich im Kühlfall für mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung (80 %, Sommerbypass) höhere Werte ergeben als für die gleiche Zone mit Fensterlüftung. Bei einer mittelschweren Bauweise ergeben sich Änderungen des Kühlkältebedarfs für eine mechanisch belüftete Zone zwischen ca. 30 bis 180 % gegenüber dem Fall mit Fensterlüftung, siehe Bild 33, die Werte für die Zu-/Abluftanlage liegen also etwa zwischen dem Anderthalb- bzw. Dreifachen der Werte für die Fensterlüftung.

Für den Heizfall liegen die Ergebnisse der Nutzenergie mit mechanischer Lüftung ca. 40 bis 50 % unter denen ohne mechanische Lüftung. Dieser Trend ist plausibel.

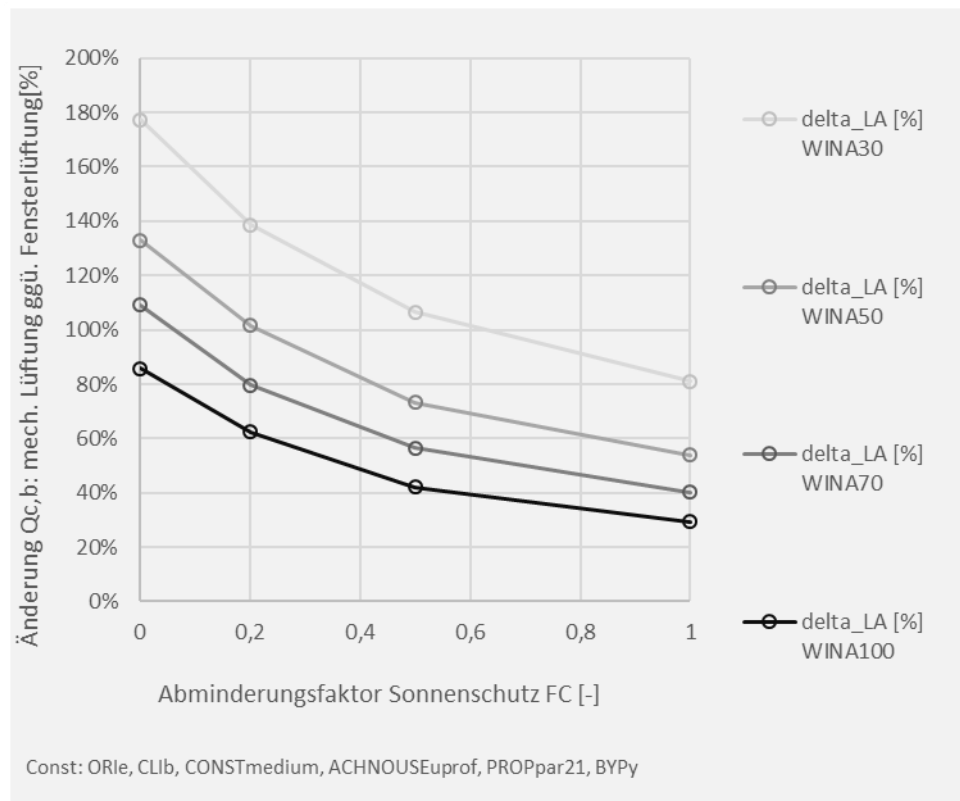


Bild 33: Änderung Nutzenergie Kühlen $Q_{c,b}$ für den Fall mit mechanischer Lüftung gegenüber Fensterlüftung

Gemäß der Bilanzgleichung für die Nutzenergie im Kühlfall ergibt sich der **Nutzkältebedarf** $Q_{c,b}$ aus den nicht nutzbaren Wärmequellen, d.h. dem Produkt aus $(1 - \eta)$ und der Summe der Wärmequellen Q_{source} , beides bestimmt unter Zugrundelegung der Randbedingungen des Kühlfalls.

$$\text{Nutzkältebedarf } Q_{c,b} = (1 - \eta) Q_{source} \quad (10)$$

Der **Ausnutzungsgrad** für die Wärmequellen η ermöglicht die Ermittlung der nutzbaren Wärmequellen und ergibt sich aus dem Verhältnis der Wärmequellen zu den Wärmesenken γ und der Gebäudezeitkonstante τ , welche wiederum aus dem Verhältnis der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} zur Summe der Wärmetransferkoeffizienten (Transmission und Lüftung) bestimmt wird.

Durch den Einsatz einer mechanischen Lüftungsanlage (Zu-/Abluft) mit Wärmerückgewinnung (80 %) ergibt sich gegenüber dem Fall mit Fensterlüftung eine Minderung der Lüftungs-Wärmesenken, daher ergeben sich größere Werte für das Verhältnis γ . Der Ausnutzungsgrad der Wärmequellen stellt bezogen auf das **Quellen-Senken-Verhältnis** einen fallenden Graphen dar, was sich aus der Bestimmungsgleichung ergibt (z.B. mit $a = 2$), daher sinkt η mit steigendem γ .

$$\text{Ausnutzungsgrad } \eta = (1 - \gamma^a) / (1 - \gamma^{a+1}) \quad (11)$$

Der **Nutzkältebedarf** ist direkt proportional zur Differenz $(1 - \eta)$, daher ergibt sich eine Erhöhung der Nutzenergie bei abnehmendem η .

9.6.3 Fazit für die Behandlung der Lüftung im Berechnungsansatz des Nutzkältebedarfs gem. DIN V 18599

Der Berechnungsansatz für die Nutzenergie im Kühlfall basiert auf der Bilanzierung der nicht nutzbaren Wärmegewinne [13]. In dieser **Bilanz** finden die Wärmequellen Q_{source} direkt (proportional) Berücksichtigung, die Wärmesenken - v.a. durch Transmission und Lüftung - sind jedoch nur indirekt über das Quellen-Senken-Verhältnis als abhängige Größe im Ausnutzungsfaktor enthalten.

Für den **Klima**-Referenzstandort Potsdam ergibt sich als maximale Außenlufttemperatur 19 °C (Mittelwert Juli), dieser Wert liegt unter der Bilanzinnentemperatur, welche sich i.d.R. für Nutzungstage zwischen 20 und 21 °C einstellt. Die Unterscheidung von Quellen und Senken erfolgt über die **Temperaturdifferenz** innen außen, d.h. in dem Fall, dass die Außentemperatur die Innentemperatur nicht übersteigt, ergeben sich auch keine Wärmequellen für Transmission und Lüftung (Fensterlüftung, Bezugstemperatur Außenluft). Da es sich bei DIN V 18599 um eine Tagesbilanz handelt, stellen diese Temperaturen immer **Tagesmittelwerte** dar, eine Änderung im Tagesgang kann daher nicht abgebildet werden.

Beispiel für Transmission im Kühlfall: Der aus der Baupraxis bekannte Fall der sommerlichen Überhitzung eines ungedämmten Dachgeschosses gegenüber einem ausreichend gedämmten Fall kann mit diesem Bilanzansatz nicht abgebildet werden. Die Berechnung des **Nutzkältebedarfs** würde z.B. für einen südorientierten Raum (50 % Fensterflächenanteil, innenliegender Sonnenschutz, leichte Bauweise) im Fall des guten Wärmeschutzes (ENVE16) einen Wert von 134 kWh/a ergeben, der Fall mit schlechter Dämmung läge bei 88 kWh/a. Im Bilanzansatz kann also nicht abgebildet werden, dass durch die besser Dämmung die Transmissionswärmequellen reduziert werden können, da diese nicht abgebildet werden können. Nur die Erhöhung der Transmissionswärmesenken wird im Modell berücksichtigt, welche zu einer Reduktion der Nutzkälte führt.

Die Bilanzierung der Wärmesenken im Kühlfall zeigt im Fall der Lüftung weitere Probleme, welche über die beschriebene Quellen-Senken-Problematik hinausgehen. Aus der Behandlung der Mindestanforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz gemäß DIN 4108-2 ist bekannt, dass weitere Aspekte Einfluss auf das Verhalten im Kühlfall ausüben. Im Einzelnen werden z.B. im Verfahren der Sonneneintragskennwerte folgende Einflussgrößen identifiziert und quantifiziert.

- Die **Geometrie** der betrachteten Räume sowie der Fensterflächen ist ebenso relevant für das sommerliche Wärmeverhalten wie die **Orientierung** bezogen auf die Himmelsrichtung. Beides kann im Bilanzansatz

der DIN V 18599 für den Kühlfall ebenfalls physikalisch berücksichtigt werden.

- Für die Fenster ist die energetische Qualität des **Glases** sowie der **Verschattung** ebenfalls von Relevanz und wird für DIN V 18599 ebenso wie für die Berechnungen im Rahmen des sommerlichen Wärmeschutzes (Simulation) über den Gesamtenergiedurchlassgrad g_{tot} (Glas einschließlich Verschattung) abgebildet.
- Weitere Einflussgrößen, welche im Verfahren der DIN V 15899 äquivalent abgebildet werden können, sind die **Gebäudeschwere** (pauschal leicht, mittel, schwer) und die **Klimaregion** (A, B, C). Einzelne Effekte zur Bestimmung der anteiligen Sonneneintragskennwerte gemäß Tabelle 8 der DIN 4108-2 finden bereits in den vorgenannten Punkten Berücksichtigung, d.h. grundflächenbezogener Fensterflächenanteil, Sonnenschutzglas, Fensterneigung und Nordorientierung.
- Als wesentliche Einflussgröße bei der Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes über das Verfahren der Sonneneintragskennwerte oder mittels thermischer Gebäudesimulation ist die Berücksichtigung einer erhöhten ($n = 2 \text{ h}^{-1}$) oder hohen ($n = 5 \text{ h}^{-1}$) **Nachtlüftung**, im Fall der Simulation kann auch ein erhöhter **Tagluftwechsel** ($n = 3 \text{ h}^{-1}$) bei der Berechnung berücksichtigt werden. Beide Aspekte können durch die fehlende Abbildung des Tagesganges im Verfahren der DIN V 18599 nicht in Ansatz gebracht werden.

Da also der Bilanzansatz der DIN V 18599 die Lüftung im Kühlfall nur eingeschränkt abbilden kann, ist demzufolge auch der Einsatz einer mechanischen Lüftung im Vergleich zur Fensterlüftung nicht ausreichend abbildbar, wodurch sich - im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen - keine zufriedenstellende Modellierung des Referenzfalls ergeben kann. Eine darüber hinausgehende Quantifizierung eines möglichen Einflusses durch Einsatz von PCM in Lüftungsanlagen ist daher nicht sinnvoll.

9.7 Kühldecke - Nutzenergie Kühlen DIN V 18599

9.7.1 Simulationsmodell Kühldecke: Modellierung und Steuerung/Betriebsweise

Wie in Abschnitt 8.1 beschrieben, wurden in den Simulationsmodellen verschiedene Rückkühlmöglichkeiten für den Einsatz von PCM in Kühldecken integriert. Da es sich auch bei einer Kühldecke um eine aktiv betriebenes System handelt, hängt die Performance des Systems neben der Art und Menge des eingebrachten PCM-Materials insbesondere von den Betriebsweisen der Kühldecke ab. Dies beinhaltet z.B. die Betriebszeiten der aktiven Entladung der Kühldecke, die gewählte Durchflussmenge und die zur Verfügung stehenden

Kaltwassertemperaturen. Wie in Abschnitt 7.4 beschrieben, haben die unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten unterschiedliche Einflüsse auf den Nutzkältebedarf, die Kältebereitstellung an das System sowie den Endenergiebedarf und damit auch den Primärenergiebedarf.

Im Folgenden werden Untersuchungen sowohl für den Zentralraum als auch den Eckraum beschrieben, bei denen mit einer optimierten Entladestrategie der Einfluss verschiedener Kältequellen untersucht wurde. Dies waren u.a.:

- Die Verwendung einer außerhalb der Nutzungszeit betriebenen Kältemaschine mit Vorlauftemperaturen von 7 °C
- Eine außerhalb der Nutzungszeit durchgeführten Entladung der PCM-Kühldecke mittels Grundwasser bei einem angenommenen Temperaturniveau von 12 °C
- Der nächtlichen Entladung mittels eines Nasskühlturms
- Der nächtlichen Entladung mittels eines Trockenkühlturms

Für alle im Folgenden dargestellten Fälle wurde die Nutzkältebetrachtung für die Varianten mit und ohne PCM derart durchgeführt, dass der verbleibende "Rest"-Nutzkältebedarf zur Sicherstellung der Komfortanforderung (in diesem Fall 24 °C während der Nutzungszeit) bestimmt wurde. Die Variationen erfolgten hierbei entsprechend der in Tabelle 19 dargestellten Randbedingungen, wodurch eine verhältnismäßig große Bandbreite an Raumkühlbedarfen zur Verfügung steht.

Diesbezüglich ist in Bild 34 für die verschiedenen Rückkühlvarianten die Reduktion des Kühlkältebedarfs in Abhängigkeit des Kältebedarfs im Referenzfall dargestellt. Erkennbar ist, dass für alle Varianten, die Reduktion mit dem Ansteigen des Referenzkühlbedarfs abnimmt, da systembedingt die Kühlkapazität der PCM-Kühldecke begrenzt ist, die tagsüber als passives Bauteil fungiert. Weiterhin ist ein deutlicher Unterschied zwischen Eck- und Zentralraum erkennbar, da im Eckraum durch die in zwei Fassaden eingebauten Fenster höhere interne Wärmequellen vorhanden sind. Beim Vorliegen kleiner Werte für den Kühlkältebedarf (Datenpunkte Abszisse links) können für den Zentralraum mit geringeren Wärmequellen und den kühleren Vorlauftemperaturen die höchsten Werte für die Reduktion erzielt werden (max. 95 %).

Insbesondere ist innerhalb der jeweiligen Raumkategorie aber auch ein deutlicher Unterschied für unterschiedliche Rückkühlstrategien erkennbar, bei denen erwartungsgemäß die Einsparpotentiale umso höher sind, je niedriger die zur Verfügung stehenden Regenerationstemperaturen sind.

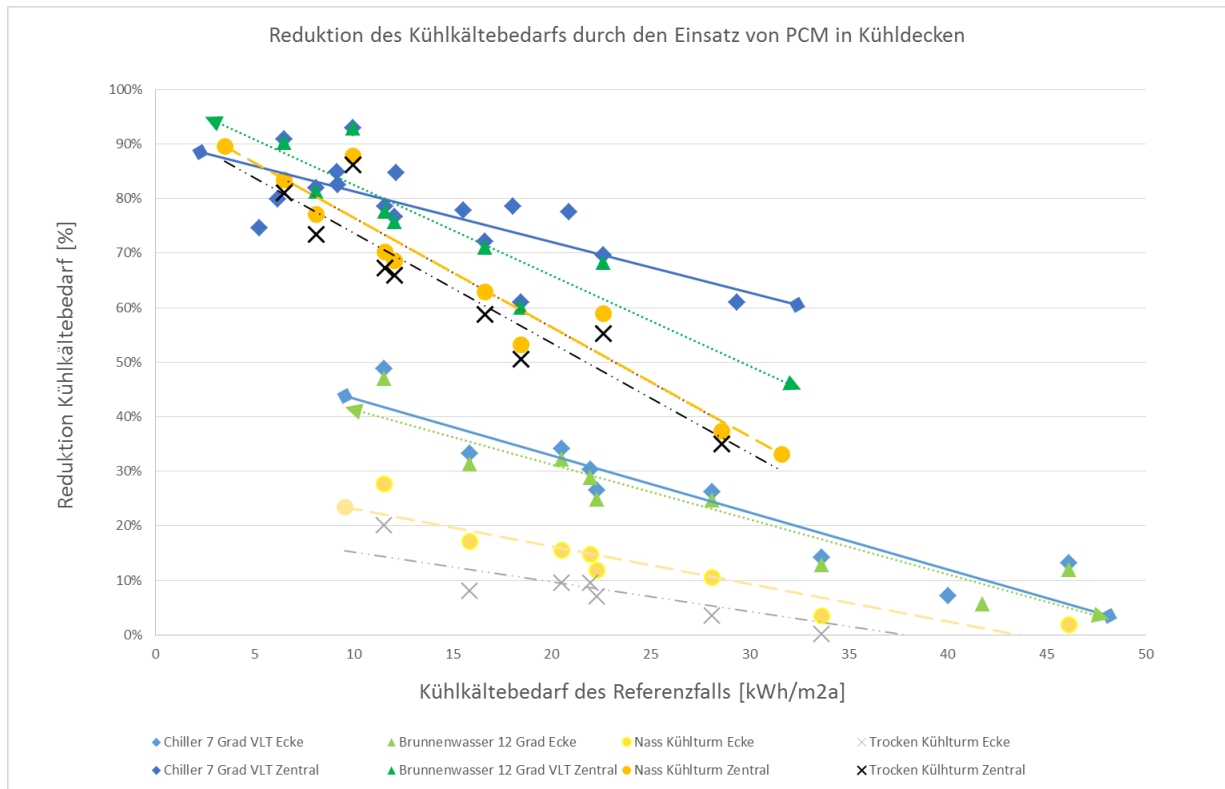


Bild 34: Kühldecke – Reduktion des Kühlkältebedarfs durch den Einsatz von PCM unter Berücksichtigung verschiedener Kältequellen

Ergänzend hierzu ist in Bild 35 der verbleibende Nutzkältebedarf in Abhängigkeit des Nutzkältebedarfs im Referenzfall dargestellt. Auch hierbei zeigt sich, dass für Räume mit niedrigem Kältebedarf eine nachts entladende PCM-Kühldecke den Kühlbedarf sehr gut decken kann, für Räume mit hohem Kältebedarf kommt die PCM-Kühldecke aber schnell an ihre Kapazitätsgrenze. Ebenso ist wiederum die unterschiedliche Performance bei den verschiedenen Rückkühlstrategien erkennbar.

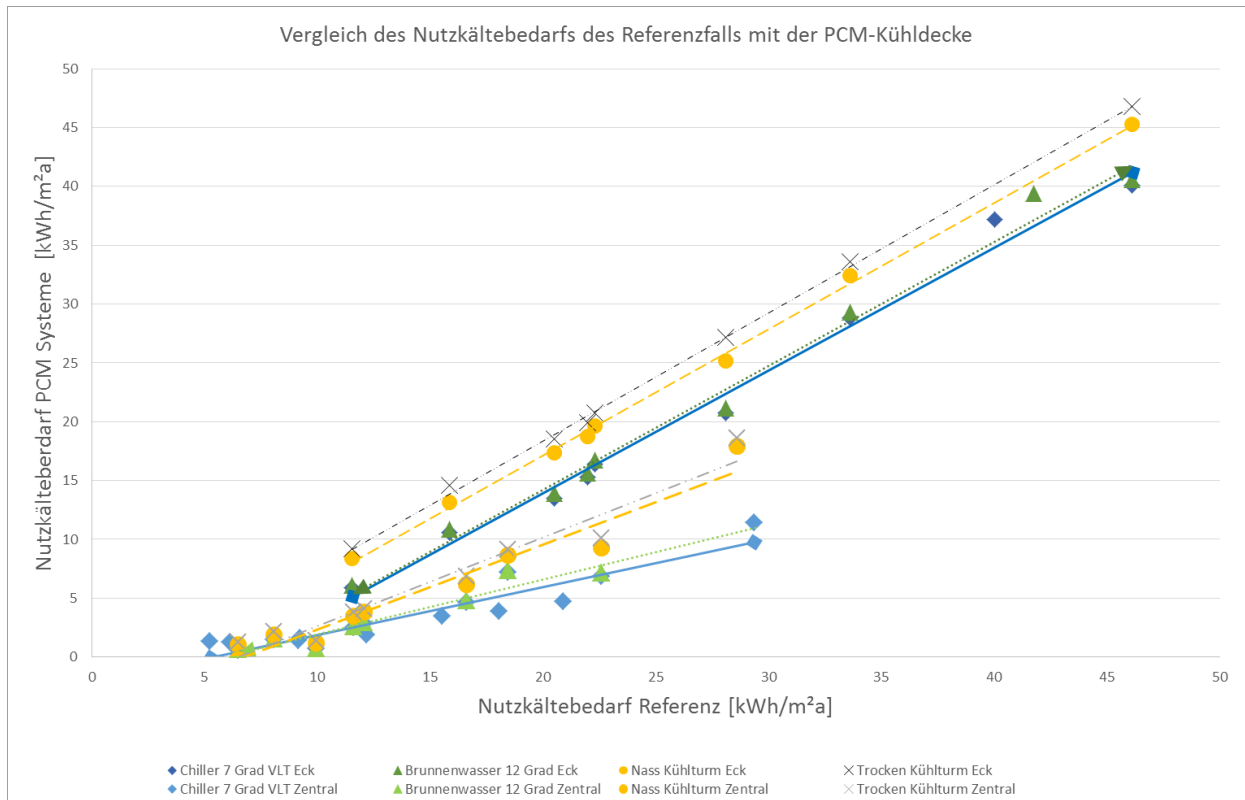


Bild 35: Vergleich des Kühlkältebedarfs des Referenzfalls mit dem der PCM-Kühldecke bei unterschiedlichen Kältequellen.

Darüber hinaus ist in Bild 36 die Energiemenge dargestellt, die für die gewählten Varianten jeweils nachts in die Kühldecke eingebracht wurde. Erkennbar hierbei ist, dass die eingebrachte Kühlenergie nur sehr leicht mit dem Raumbedarf ansteigt, da die Aufnahmekapazität der Kühldecke systembedingt beschränkt ist. Auch hier zeigt sich wiederum ein deutlicher Unterschied zwischen den verschiedenen Rückkühlstrategien.

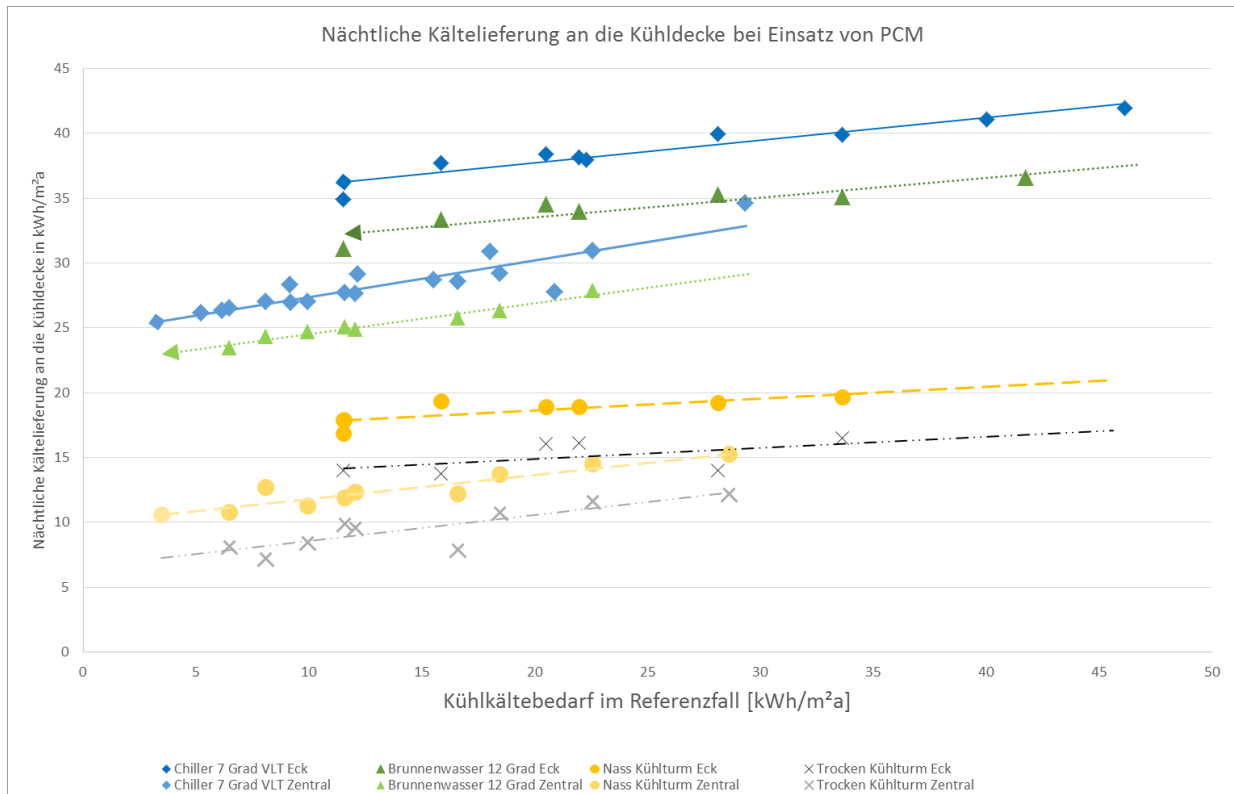


Bild 36: In die Kühldecke nachts eingebrachte Kältemenge in Abhängigkeit des Kühlkältebedarfs des Gebäudes bei Nutzung verschiedener Kältequellen

Abschließend hierzu ist in Bild 37 die Summe aus der in die Kühldecke eingebrachten Energiemenge sowie des Restkühlbedarfs in Abhängigkeit des Kühlbedarfs im Referenzfall dargestellt. Der Grenzfall, bei dem beide Werte gleich sind, ist mit einer gestrichelten Linie im Diagramm markiert. Erkennbar ist hierbei, dass für alle Rückkühlstrategien und alle Raumvarianten der Gesamtenergiebedarf eines Raumes mit PCM-Kühldecke zum Teil deutlich über dem einer konventionell betriebenen Kühldecke liegt, die Datenpunkte sich also oberhalb der Hilfslinie befinden. Für den Fall hoher Kühlbedarfswerte kann dies fast eine Verdopplung bedeuten.

Somit wird für den Fall der PCM-Kühldecke deutlich, dass eine Systemverbesserung erst durch eine end- und primärenergetische Bewertung der Kältebereitstellung sichtbar werden kann. Hierzu ist insbesondere eine Quantifizierung und Berücksichtigung aller Hilfsenergien und der Energiebedarf der Kältemaschine im Referenzfall sowie im PCM-Fall notwendig. Die Hilfsenergien beziehen sich dabei je nach Variante auf:

- Umwälzpumpen durch die PCM-Kühldecke
- Umwälzpumpen zu Nass- oder Trockenkühltürmen

- Umwälzpumpen und Förderpumpen Grundwasser
- Verdichter der Kältemaschine inklusive Rückkühlwerk

Hierbei lässt sich jedoch beobachten, dass die Bilanzierungen der Hilfsenergie sehr stark wiederum von der Betriebsstrategie des Gesamtsystems abhängt und damit eine eigene Optimierungsgröße darstellt. Sowohl die Dimensionierungen von Pumpen und Ventilatoren als auch die Bedingungen für den Betrieb im Hinblick auf eine Reduzierung der Laufzeiten haben somit einen direkten Einfluss auf die end- und primärenergetische Bewertung einer PCM-Kühldecke.

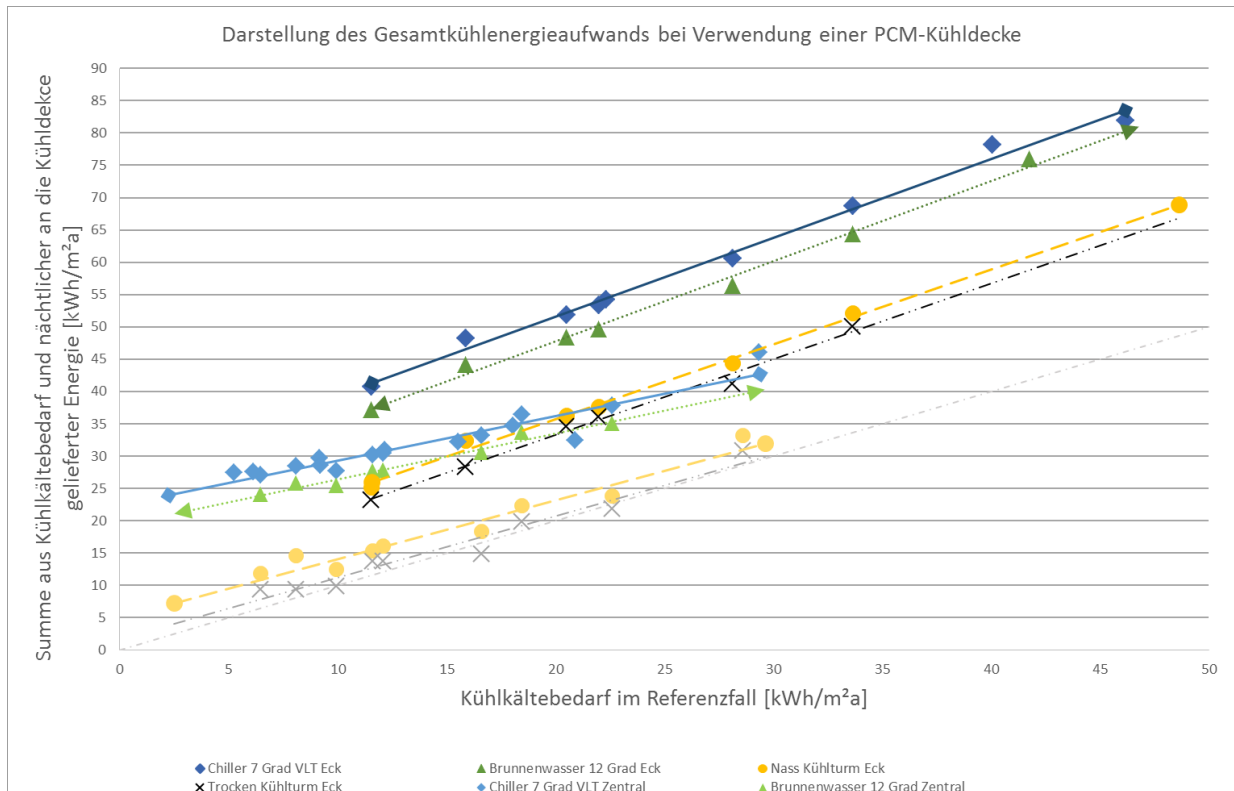


Bild 37: Darstellung des gesamten Kühlenergieaufwands einer PCM-Kühldecke in Abhängigkeit des Kühlkältebedarfs im Referenzfall bei Nutzung verschiedener Kältequellen

Insgesamt zeigt sich aber, dass keine eindeutiger Zusammenhang zwischen einer Kühlbedarfsveränderung durch den Einsatz einer PCM-Kühldecke und einer end- und primärenergetischen Einsparung herzustellen ist, ohne detailliert eine Bewertung der Rückkühlstrategien und ihrer jeweiligen Betriebsweisen durchzuführen. Speziell hinsichtlich der Integration eine PCM-Kühldecke in das Bewertungsverfahren der DIN V 18599 bedeutet dies aber, dass neben eine Anpassung der Nutzkältebedarfe (Teil 2 der DIN V 18599) zusätzlich eine Anpassung der Primär- und Endenergiebetrachtung unter Berücksichtigung aller Hilfsenergien erfolgen muss (Teil 7 und ggf. Teil 3 der DIN V 18599).

Aufgrund der im Rahmen des Projekts notwendigen Beschränkung auf Nutzkältebedarfe kann somit auf der Basis der durchgeführten Untersuchungen keine Empfehlung für die Integration von PCM-Kühldecken in die DIN V 18599 gegeben werden. Hierzu wären weitergehende Untersuchungen, bei den insbesondere mit Herstellern und Planern von PCM-Kühldeckensystemen eine Festlegung der Betriebsszenarien inklusive einer optimierten Auslegung und Betriebsführung aller Pumpen und Kälteerzeugern auf die jeweiligen Gebäudeparameter erfolgen müsste.

9.8 Kühldecke - Sommerlicher Wärmeschutz DIN 4108-2

Bei der Bewertung der PCM-Kühldecke im Hinblick auf die Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes gemäß DIN 4108-2 spielt ähnlich wie für den Ansatz der DIN V 18599 die Frage der Betriebsweise eine wesentliche Rolle. Für die Berücksichtigung von PCM-Kühldecken in der DIN 4108-2 ist somit die Wahl des entsprechenden Referenzsystems entscheidend. Möglichkeiten wären beispielsweise:

- Eine konventionell betriebene Kühldecke, die z.B. über eine aktive Kältemaschine oder Grundwasser betrieben wird
- Eine ähnlich wie die PCM-Kühldecke aufgebaute und außerhalb der Nutzungszeit betriebene Kühldecke ohne PCM
- Keine Kühldecke

Beim Vergleich mit einer konventionellen Kühldecke und deren Betrieb während der Nutzungszeit des Gebäude ergibt sich im Hinblick auf das sommerliche Wärmeverhalten systembedingt in der Regel eine Verschlechterung des thermischen Komforts, da die Kühlleistung einer PCM-Kühldecke sofort auf null abfällt, sobald das PCM-Material entladen ist.

Im Vergleich mit einem System ohne Kühldecke ergeben sich dagegen sofort deutliche Verbesserungen im thermischen Komfort, jedoch wird hierdurch ein rein passives System mit einem aktiven Kühldeckensystem verglichen, bei dem die Effekte PCM und Kältebereitstellung vermischt werden und somit eine Verbesserung im thermischen Komfort nicht eindeutig dem eingebrachten PCM zugeordnet werden kann.

Eine außerhalb der Nutzungszeit betriebene Kühldecke ohne die Einbringung von thermischen Speichern würde zwar eine direkte Zuordnung des Verbesserungspotentials dem PCM-Material ermöglichen, jedoch stellt eine solche Referenz kein praxisrelevantes System dar und wurde im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen nicht weiterverfolgt.

Beispielhaft betrachtet wurden in Bild 38 Raum- und Betriebsvarianten, bei denen idealisiert eine Raumtemperaturbegrenzung auf 24 °C berücksichtigt wurde. In Ergänzung zum derart definierten Referenzfall wurde eine PCM-Kühldecke als System erweitert, die mit den im vorherigen Kapitel beschriebenen Rückkühlvarianten betrieben wurden. Somit verdeutlicht Bild 38, dass je nach betrachteter Variante eine Verringerung der mittleren operativen Temperaturen im Temperaturbereich 22 °C-24 °C durch den Einsatz der PCM-Kühldecke erreicht werden kann. Beim Zentralraum betragen diese Verbesserung im Mittel 1 K, beim Eckraum mit dessen deutlich höherem Kühlkältebedarf sind die Verbesserungen jedoch verschwindend gering. Im Vergleich zu den Betrachtungen zur DIN V 18599 sind die Varianzen innerhalb der verschiedenen Rückkühlstrategien jedoch nicht besonders ausgeprägt.

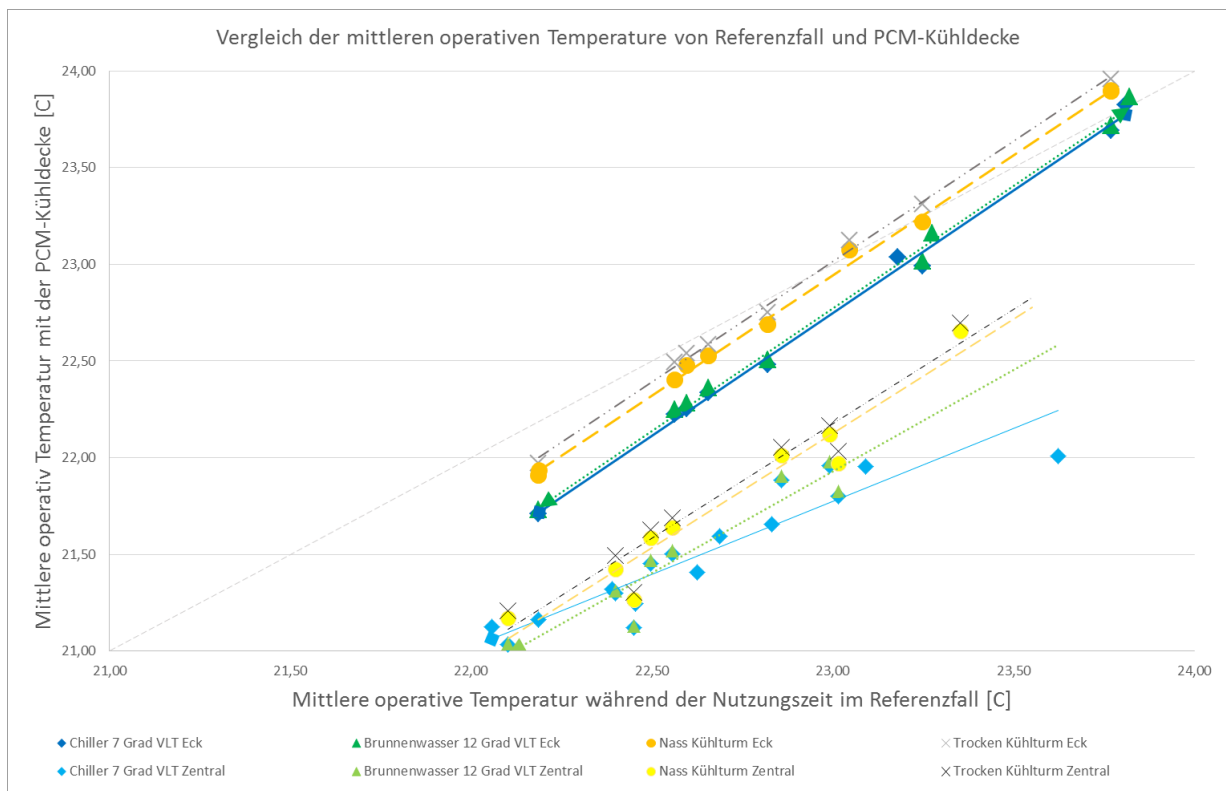


Bild 38: Vergleich der mittleren operativen Temperaturen von Referenzfall und PCM-Kühldecke bei Nutzung verschiedener Kältequellen

1 0 Fazit und Ausblick

Für den Einsatz von Phasenwechselmaterialien (Phase Change Materials, PCM) werden heute in der Baupraxis bereits verschiedene Systeme umgesetzt. Die Einsatzbereiche umfassen dabei passive Systeme (Bauplatten) sowie aktive bzw. hybride Systeme (Kühldecken und -wände, Lüftungsanlagen und Speicher).

Eine **rechnerische Bewertung** der energetischen Effekte von PCM sowie die Auswirkungen auf den thermischen Komfort kann mittels thermischen Simulationsrechnungen auf Stundenbasis erfolgen. Im Rahmen der rechtlich erforderlichen Nachweisverfahren

- Energieeinsparverordnung EnEV [1] bzw. zukünftiges Gebäudeenergiegesetz GEG (DIN V 18599 [2]) sowie
- Mindestanforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz (DIN 4108-2 [3])

finden thermische Simulationsrechnungen nur in Ausnahmefällen (EnEV) bzw. nicht als Regelverfahren (DIN 4108-2) Anwendung. Wünschenswert wäre die Möglichkeit, den Einsatz von PCM in die **normativen Berechnungsverfahren** zu implementieren, um so eine energetische Bewertung dieser Systeme auch im Rahmen der Nachweisführung - d.h. für eine weiter verbreitete Anwendung - zu ermöglichen und auf diese Weise den Einsatz von PCM-Systemen zu fördern.

Diesbezüglich werden im vorliegenden Forschungsvorhaben durch den vergleichenden Ansatz von numerischen, dynamischen Simulationen und normativen Berechnungsvorschriften geeignete **Schnittstellen und Algorithmen** (Ansätze) identifiziert und verifiziert. Der Prozess der Verifikation erfolgt mittels der Gegenüberstellung von Berechnungsergebnissen aus thermischen Gebäudesimulationen und normativen Berechnungen auf Grundlage einheitlicher und abgestimmter Modelle und Randbedingungen.

Hierbei werden detaillierte Simulationsmodelle für unterschiedliche PCM-Anwendungen entwickelt und unter Verwendung von Messwerten aus Labor- und Demonstrationsprojekten validiert. Die betrachteten **Systeme** sind dabei:

- PCM-Bauplatten, die als rein passives System in Wänden und Decken verbaut werden, um die thermische Speicherfähigkeit eines Raumes zu erhöhen.
- PCM-Speicher, die in die Lüftungsanlage eines Gebäudes bzw. eines Raumes integriert werden und im Umluftbetrieb dazu dienen, Temperaturspitzen der Raumluft zu puffern und eine Entladung dieser Wärme in den kühlen Nachtstunden zu ermöglichen.

- Eine mit PCM-Platten belegte Kühldecke, die es erlaubt, die Kälteerzeugung in die Nachstunden zu verschieben und dabei entweder die Nutzung erneuerbar erzeugter Kälte ermöglicht oder aber auch den Wirkungsgrad der Kälteerzeugung durch den nächtlichen Betrieb (z.B. einer Kompressionskältemaschine) erhöht.

Alle verwendete Modelle für die PCM-Systeme werden an Messdaten **validiert**, wobei für die in der weiteren Bearbeitung untersuchten Szenarien die eingesetzten PCM-Mengen jeweils situativ angepasst werden. Des Weiteren können nicht in allen Fällen deckungsgleiche Randbedingungen in Ansatz gebracht werden, bedingt durch die Unterschiede zwischen Simulation und normativer Berechnung, z.B. bei Vorlage von Stundenwerten einerseits und Tages- bzw. Monatsmittelwerten andererseits.

Aus der im Projekt erarbeiteten Definition **kongruenter Randbedingungen** werden allgemeine Empfehlungen für die Wahl geeigneter Randbedingungen für Simulationen abgeleitet, welche beispielsweise in DIN 4108-2 (Abschnitt "Berechnungsrandbedingungen für thermische Gebäudesimulationsrechnungen") aufgenommen werden können.

Im Zuge der Projektbearbeitung haben sich an einigen Stellen unterschiedliche Sachverhalte ergeben, durch die die **Umsetzung einzelner Projektziele** in der geplanten Form in Frage gestellt wurden.

Für die Gegenüberstellung der energetische Bewertung des Einsatzes von PCM mittels (instationärer) Simulation und (stationärer) Berechnung nach Norm ist es zunächst zwingend erforderlich, eine **Kalibrierung eines Referenzfalles** ohne PCM zu erreichen, um auf dieser Basis weitere quantifizierende Betrachtungen inklusive PCM-Einfluss anstellen zu können. Dies konnte für die drei untersuchten Systeme (Bauplatte, Kühldecke, Lüftungsanlage) und die beiden betrachteten Nachweisverfahren (energetische Bewertung, sommerlicher Wärmeschutz) aufgrund signifikanter Abweichungen zwischen stationärer (normativer) Bewertung und Simulation nicht erreicht werden.

Bei der Gegenüberstellung der Ergebnisse vereinfachter Verfahren (Nutzenergie DIN V 18599, Sonneneintragskennwert DIN 4108-2) und thermischer Simulationsmodelle sollen - nach dem Verständnis der für die Formulierung der Verfahren zuständigen Normungskreise - die vereinfachten Ansätze üblicherweise ungünstige Werte liefern, als die aufwändigeren Simulationsrechnungen, also **"auf der sicheren Seite"** liegen. Im Rahmen der Bearbeitung des vorliegenden Projektes wurde dies erwartet, mindestens für den Referenzfall ohne PCM, konnte jedoch nicht in allen Fällen erzielt werden.

Generell reagieren Simulationsmodelle v.a. bezogen auf den **Sommerfall** aufgrund ihres instationären Ansatzes sehr **sensibel** auf unterschiedliche Randbedingungen und erfordern je nach verwendeter Randbedingungen die Anpas-

sung weiterer Modellparameter. Dies zeigt sich insbesondere beim Einsatz **unterschiedlicher Simulationswerkzeuge**.

Vor allem vor dem Hintergrund der letzten Überarbeitung der Normung (DIN 4108-2, adhoc-Gruppe sommerlicher Wärmeschutz) und der Novellierungen der rechtlichen Vorgaben (Nachweisführung, EnEV, GEG, Mindestwärmeschutz) zeigen die Erfahrungen und Erkenntnisse aus der Begleitung der Anwendung, dass in zunehmendem Maße ein dringender **Überarbeitungsbedarf** der Norm bezüglich des Einsatzes von Simulationen für den sommerlichen Wärmeschutz gegeben ist.

Eine Vielzahl wesentlicher, das sommerliche Wärmeverhalten von Räumen beeinflussender Randbedingungen wird zwar bereits durch den dafür vorgesehenen Abschnitt 8.4.2 in DIN 4108-2:2013-02 geregelt. Die **Erfahrungen** zeigen jedoch, dass die gegenwärtigen Formulierungen von "einheitlichen" Simulationsrandbedingungen nicht sicherstellen, dass verschiedene Modelle bei Einsatz unterschiedlicher Softwareanwendungen vergleichbare Ergebnisse erzielen.

Für die PCM-**Bauplatte** als passives Bauteil konnte mit den Simulationsrechnungen gezeigt werden, dass sowohl eine Verbesserung des sommerlichen Wärmeverhaltens als auch des Nutzkältebedarfs erreicht werden kann. Die Auswertung der dargestellten Parametervariationen ergibt jedoch Einschränkungen bei der Vergleichbarkeit der Ergebnisse der beiden Berechnungsansätze, v.a. bezogen auf den Referenzfall ohne PCM.

Es konnte gezeigt werden, dass für einen möglichen Bewertungsansatz für den Einsatz von PCM im Rahmen der Berechnung des Nutzkältebedarfs nach DIN V 18599 ausreichend zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden können. Dabei wird bei der Bewertung der Gebäudeschwere in drei möglichen Klassen (leicht, mittel, schwer) vorgeschlagen, dass im Falle des Einsatzes von PCM unter bestimmten (noch zu definierenden) Randbedingungen erlaubt wird, die jeweils schwerere Klasse für die Berechnungen in Ansatz zu bringen, d.h. mittel statt leicht bzw. schwer statt mittel). Dieser Ansatz bietet sich daher für weitere Untersuchungen als lohnenswert an.

Für die Integration von PCM in **Lüftungsanlagen** ergeben sich auf Basis der Simulationsrechnungen für die absoluten Werte der Übertemperaturgradstunden bei größeren Fensterflächenanteilen und für die Fälle ohne oder mit innenliegendem Sonnenschutz keine Konstellationen, welche sich im Rahmen der Einhaltung der Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz bewegen. Die meisten der mittels der Simulationen bestimmten Werte liegen teilweise außerhalb des zu erwartenden Wertebereichs. Die sich ergebenden relativen Veränderungen zwischen den Fällen mit und ohne PCM sind dabei nicht klar einschätzbar, da sich neben teilweise guten Übereinstimmungen jedoch einige "Ausreißer" einstellen.

Die Ergebnisse zur Nutzenergie zeigen, dass sich im Kühlfall für mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung höhere Werte ergeben als bei Nutzung von Fensterlüftung. Bei einer mittelschweren Bauweise ergeben sich Änderungen des Kühlkältebedarfs für eine mechanisch belüftete Zone zwischen ca. 30 bis 180 % gegenüber dem Fall mit Fensterlüftung. Für den Heizfall liegen die Ergebnisse der Nutzenergie mit mechanischer Lüftung ca. 40 bis 50 % unter denen ohne mechanische Lüftung. Dieser Trend ist plausibel.

Zudem konnte gezeigt werden, dass im Bilanzansatz der DIN V 18599 die Lüftung im Kühlfall nur eingeschränkt abgebildet werden kann. Demzufolge ist auch der Einsatz einer mechanischen Lüftung im Vergleich zur Fensterlüftung nicht ausreichend abbildbar, wodurch sich - im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen - keine zufriedenstellende Modellierung des Referenzfalls ergeben kann. Eine darüber hinausgehende Quantifizierung eines möglichen Einflusses durch Einsatz von PCM in Lüftungsanlagen ist daher nicht sinnvoll.

Hinsichtlich der Betrachtung der **Kühldecke** im Bilanzansatz der DIN V 18599 zeigt sich, dass verschiedene Rückkühlmöglichkeiten für den Einsatz von PCM in Kühldecken betrachtet werden müssen. Da es sich auch bei einer Kühldecke um eine aktiv betriebenes System handelt, hängt die Performance des Systems neben der Art und Menge des eingebrachten PCM-Materials insbesondere von den Betriebsweisen der Kühldecke ab. Hierbei haben die unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten unterschiedliche Einflüsse auf den Nutzkältebedarf, die Kältebereitstellung an das System sowie den Endenergiebedarf und damit auch den Primärenergiebedarf.

Eine Systemverbesserung wird dabei erst durch eine end- und primärenergetische Bewertung der Kältebereitstellung sichtbar. Hierzu ist insbesondere eine Quantifizierung und Berücksichtigung aller Hilfsenergien und der Energiebedarf der Kältemaschine im Referenzfall sowie im PCM-Fall notwendig. Insgesamt zeigt sich dabei, dass kein eindeutiger Zusammenhang zwischen einer Kühlbedarfsveränderung durch den Einsatz einer PCM-Kühldecke und einer end- und primärenergetischen Einsparung herzustellen ist, ohne detailliert eine Bewertung der Rückkühlstrategien und ihrer jeweiligen Betriebsweisen durchzuführen. Daraus ergeben sich für die Kühldecke Probleme mit dem gewählten Untersuchungsansatz des Kühlkältebedarfs, welcher die Möglichkeiten der Ergebnisauswertung einschränkt aber mit Rücksicht auf die fortgeschrittene Projektlaufzeit nicht mehr angepasst werden konnte. Dies sollte Gegenstand weitergehender Untersuchungen sein.

Im Hinblick auf das sommerliche Wärmeverhalten von passiv aktivierten PCM-Kühldecken in der DIN 4108-2 ist die Wahl des entsprechenden Referenzsystems entscheidend, da sich beispielsweise im Vergleich zu einer konventionell betriebenen Kühldecke in der Regel Verschlechterungen hinsichtlich Überhitzungen (vor allem in den Nachmittagsstunden) ergeben. Im Vergleich mit einem System ohne Kühldecke ergeben sich dagegen sofort deutliche Verbesserungen im thermischen Komfort. Der Vergleich zwischen einem reinen passiven

System mit einem aktiven Kühldeckensystem, führt zu einer Vermischung der bei Effekte PCM-Einsatz und Kältebereitstellung und somit kann eine Verbesserung im thermischen Komfort nicht eindeutig dem eingebrachten PCM zugeordnet werden. Aufgrund der nicht ausreichend definierten Vergleichbarkeit können somit im Rahmen dieser Untersuchungen keine Empfehlungen zur Integration von PCM-Kühldecken in die normativen Ansätze zum sommerlichen Wärmeverhalten von Gebäuden gemacht werden.

Als **Ausblick** auf die weiteren Entwicklungen bei der Erarbeitung einer Möglichkeit für die Bewertung des PCM-Einsatz v.a. beim System der Kühldecken wird für die Behandlung des sommerlichen Wärmeschutzes vorgeschlagen, den bei den anteiligen Sonneneintragskennwerten definierten Effekt des Einsatzes passiver Kühlung weiter zu untersuchen. Bisher enthält der Text der DIN 4108-2 nur unzureichende Erläuterungen oder Definitionen, was unter "passiver Kühlung" zu verstehen ist. In dem Falle, dass hier in Zukunft die Rahmenbedingungen spezifiziert werden, wäre es denkbar und lohnend, den Einsatz von PCM-Systemen unter bestimmten (zu definierenden) Randbedingungen bei dieser Spezifizierung mit zu berücksichtigen.

Wegen der oben beschriebenen Abweichungen wird zusammengefasst über alle drei betrachteten Systeme den Ergebnissen der Überwärmungen bzw. der Veränderung im Energiebedarf der Varianten mit integriertem PCM nicht genug **Vertrauen** entgegengebracht, um den Einfluss des PCMs im Rahmen eines Normungsvorschlags entsprechend bewerten zu können.

Als Ausblick wird die Erarbeitung einer detaillierten und präzisen **Richtlinie** empfohlen, die regelt, wie PCM-Anwendungen in einer dynamischen Simulation abgebildet werden können. Dies wird eine wertvolle Grundlage für viele verschiedenartige Weiterentwicklungen der Normen DIN 4108-2 bzw. DIN V 18599 darstellen.

Im Lauf der Projektbearbeitung hat sich auch gezeigt, dass die angesetzten PCM-**Mengen** erwartungsgemäß einen starken Einfluss auf die resultierende Wirksamkeit des jeweiligen PCM-Systems haben. Da die eingesetzten Mengen an PCM jedoch die Systemkosten wesentlich beeinflussen, und aufgrund des geringen Baubestands mit derartigen Systemen nicht auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden kann, muss bei einer weiteren Bewertung des PCM-Einflusses zwingend der ökonomische Aspekt mit bewertet werden.

- [1] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE; BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG: *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden* (idF v. 24. 7. 2007, letzte Novellierung 18. 11. 2013, letzte Änderung 28. 10. 2015). In: *Bundesgesetzblatt, Teil I* 26.7.2007, S. 1519-1563, 21.11.2013, S. 3951-3990, 24.10.2015, S. 1790
- [2] Vornorm DIN V 18599. 2016-10. *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung (Normenreihe)*
- [3] DIN 4108-2. 2013-02. *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*
- [4] BUNDESTAG: *Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich* (idF v. 7. 8. 2008, letzte Änderung 20. 10. 2015). In: *Bundesgesetzblatt, Teil I* 7.8.2008, S. 1658, 20.10.2015, S. 1722, 1732
- [5] Vornorm DIN V 18599-2. 2016-10. *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen*
- [6] *Projekt PCM-Demo II, Informationen*. URL <https://www.pcm-demo.info/informationen> – Überprüfungsdatum 2018-07-18
- [7] VDI 2164. 2016-12. *PCM-Energiespeichersysteme in der Gebäudetechnik*
- [8] SCHOSSIG, Peter: *Mikroverkapselte Phasenwechselmaterialien in Wandverbundsystemen*. Stuttgart : IRB Verlag, 2007
- [9] DARIUSZ HEIM: *Numerical modelling and thermal simulation of PCM-gypsum composites with ESP-r*. In: *Energy and buildings* 36 (2004), S. 795–805
- [10] HAUSSMANN, Thomas ; HEUER, Andreas ; MERTES, Frank ; BAUER, Stefan ; WINKELHAUS, Matthias ; BOITING, Bernd: *PCM Zentral: Entwicklung und Demonstration eines Erdregisters mit Latentwärmespeicher : Abschlussbericht zum Verbundforschungsvorhaben : gemeinsamer Bericht aller Projektpartner in den Teilprojekten 0327842A-D : Laufzeit 01.02.09-31.12.14*. Freiburg : Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, 2015
- [11] MAKULLA, D. ; HEUSLER, I. ; SINNESBICHLER, H. ; SCHOLZ, C. ; GSCHWANDER, S.: *Dezentrale Fassadengeräte mit Phasenwechselmaterial*. In: *Lüftung + Brandschutz* 63 (1), S. 35–40
- [12] SCHLITZBERGER, Stephan: *Anpassung und Entwicklung von Planungswerkzeugen für den sommerlichen Mindestwärmeschutz und zur Komfortbewertung des Sommerfalls*. Kassel, Univ., Diss., 2014. Kassel : Universitätsbibliothek Kassel, 2014
- [13] DAVID, Ruth et al.: *Heizen, Kühlen, Belüften & Beleuchten : Bilanzierungsgrundlagen nach DIN V 18599*. Stuttgart : Fraunhofer IRB Verl., 2006

- [14] MAAS, Anton ; HÖTTGES, Kirsten ; KLAUB, Swen ; STIEGEL, Horst: *Auswirkung des Einsatzes der DIN V 18599 auf die energetische Bewertung von Wohngebäuden - Reflexion der Berechnungsansätze : [Abschlussbericht]*. Stuttgart : Fraunhofer-IRB-Verl, 2012 (Forschungsinitiative ZukunftBau F 2817)
- [15] Vornorm DIN V 18599-10. 2016-10. *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten*
- [16] DIN 4108-4. 2013-02. *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte*
- [17] DIN EN 12831. 2003-08. *Heizungsanlagen in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast*
- [18] DIN EN 13779. 2007-09. *Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme*
- [19] DIN EN 15251. 2012-12. *Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik*
- [20] DIN EN ISO 10456. 2010-05. *Baustoffe und Bauprodukte - Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte*
- [21] DIN EN ISO 13370. 2008-04. *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Wärmeübertragung über das Erdreich - Berechnungsverfahren*
- [22] DIN EN ISO 13789. 2008-04. *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Spezifischer Transmissions- und Lüftungswärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren*
- [23] DIN EN ISO 13791. 2012-08. *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden -Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik - Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren*
- [24] DIN EN ISO 13791. 2012-08. *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden -Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik - Vereinfachtes Berechnungsverfahren*
- [25] DIN EN ISO 13786. 2008-04. *Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen - Dynamisch-thermische Kenngrößen - Berechnungsverfahren*
- [26] DIN EN ISO 6946. 2008-04. *Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren*
- [27] VDI 2078. 2015-06. *Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation)*
- [28] VDI 6007-1. 2007-10. *Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden - Raummodell*
- [29] VDI 6007-2. 2012-06. *Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden - Fenstermodell*

- [30] VDI 6007-3. 2015-06. *Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden - Modell der solaren Einstrahlung*
- [31] VDI 6020-1. 2001-05. *Anforderungen an Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation Gebäudesimulation*
- [32] GEMEINSAME BEKANNTMACHUNG DES BUNDESMINISTERIUMS FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE UND DES BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT: *Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Wohngebäudebestand* (idF v. 7. 4. 2015)
- [33] MAAS, Anton ; HÖTTGES, Kirsten: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen (DIN V 18599-2). In: *Bauphysik-Kalender 2013*. Berlin : Ernst & Sohn, 2013, S. 251–273
- [34] DIN EN ISO 7730. 2006-05. *Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit*
- [35] DIN EN 442-2. 2015-03. *Radiatoren und Konvektoren - Teil 2: Prüfverfahren und Leistungsangabe*
- [36] DIN EN 14240. 2004-04. *Lüftung von Gebäuden - Kühldecken - Prüfung und Bewertung*
- [37] ERNST-RUDOLF SCHRAMEK (Hrsg.): *Recknagel+Sprenger - Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik*. München : Oldenbourg-Industrieverlag, 2005

1 2 Anhang: Randbedingungen DIN 4108-2

12.1 Randbedingungen vereinfachtes Verfahren (Sonneneintragskennwerte)

12.1.1 Nettogrundfläche und Raumtiefe

[Hinweis: der Text entspricht dem Text der Norm.]

Die Nettogrundfläche A_G wird mit Hilfe der **lichten Raummaße** ermittelt. Bei sehr tiefen Räumen muss die für den Nachweis anzusetzende **Raumtiefe begrenzt** werden. Die größte anzusetzende Raumtiefe ist mit der dreifachen lichten Raumhöhe zu bestimmen. Bei Räumen mit gegenüberliegenden Fensterfassaden ergibt sich keine Begrenzung der anzusetzenden Raumtiefe, wenn der Fassadenabstand kleiner/gleich der sechsfachen lichten Raumhöhe ist. Ist der Fassadenabstand größer als die sechsfache lichte Raumhöhe muss der Nachweis für die beiden der jeweiligen sich ergebenden fassadenorientierten Raumbereiche durchgeführt werden. Bei der Ermittlung der wirksamen Wärmekapazität sind die raumumschließenden Bauteile nur soweit zu berücksichtigen, wie sie das Volumen bestimmen, das aus der Nettogrundfläche A_G und lichter Raumhöhe gebildet wird.

12.1.2 Fensterrahmenanteil und Fensterfläche

[Hinweis: der Text entspricht dem Text der Norm.]

Das vereinfachte Verfahren mittels des Sonneneintragskennwertes S nach 8.3 ist für Fenster mit einem Rahmenanteil von 30 % abgeleitet worden. Näherungsweise kann dieses Verfahren auch angewendet werden bei Gebäuden mit Fenstern, die einen Rahmenanteil ungleich 30 % haben. Soll der Einfluss des Fensterrahmenanteils genauer berücksichtigt werden, muss auf die unter 8.4 beschriebenen thermischen Gebäudesimulationen unter Berücksichtigung der nach 8.4.2 anzusetzenden Randbedingungen zurückgegriffen werden.

Zur Bestimmung der Fensterfläche A_W wird das lichte Rohbaumaß verwendet, d. h. das Blendrahmenaußenmaß (einschließlich aller Rahmenaufdoppelungen) zuzüglich Einbaufuge oder Montagefuge (siehe Bild 2). Dabei sind Putz oder gegebenenfalls vorhandene Bekleidungen nicht zu berücksichtigen.

12.1.3 g-Wert, Sonnenschutz und bauliche Verschattung

Der Material-Kennwert für den Strahlungsdurchgang einer Verglasung wird als g-Wert bezeichnet.

Für das Gesamtsystem Fenster und Sonnenschutzvorrichtung wird als Kennwert g_{tot} verwendet. Der Quotient aus g_{tot} und dem g-Wert der Verglasung ist der Faktor F_G , d.h. der Einfluss der Sonnenschutzvorrichtung in Verbindung mit einer bestimmten Ausführung des Glases. In Tabelle 7 der DIN 4108-2 sind An-

haltenswerte für den Abminderungsfaktor F_c von fest installierten Sonnenschutzvorrichtungen angegeben.

Eine bauliche Verschattung kann über die Teilbestrahlungsfaktoren F_5 Berücksichtigung finden, welche nach DIN V 18599-2 Anhang A.2 bestimmt werden (Verschattung durch Überhänge, Bauteilüberstände, andere Gebäude oder Topographie).

12.1.4 Bauart (wirksame Wärmespeicherfähigkeit)

Der Einfluss der Gebäudeschwere wird über die Klassifizierung Bauart "leicht", "mittel" und "schwer" berücksichtigt. Ohne Nachweis der wirksamen Wärmekapazität ist von leichter Bauart auszugehen. Für mittlere oder schwere Bauarten sind für die Einordnung Eigenschaften angegeben, welche nachzuweisen sind. Diese sind im Text zur Fußnote b) der Tabelle 8 definiert und sind so gut wie deckungsgleich zu den Kriterien, welche in DIN V 18599-2 genannt sind.

12.2 Berechnungsrandbedingungen für thermische Gebäudesimulationsrechnungen

Aktuell unterliegen die in der Norm definierten Randbedingungen für Simulationsrechnungen einer generellen Prüfung im Rahmen einer vom DIN eingerichteten AdHoc-Gruppe. Da einige Projektpartner auch im Kreis der AdHoc-Gruppe vertreten sind, erfolgt zeitnah eine Spiegelung der dort zu entwickelnden erweiterten Definitionen von Randbedingungen in das vorliegende Projekt.

[Hinweis: der Text entspricht dem Text der Norm (Abschnitt 8.4.2) [3].]

a) Simulationsumgebung

Das für den Nachweis verwendete Programm ist im Rahmen der **Dokumentation** zu nennen.

b) Nutzungen/Nutzungszeiten

- Wohngebäude: täglich, 0:00 Uhr bis 24:00 Uhr
- Nichtwohngebäude: Mo. - Fr., jeweils in der Zeit von 7:00 Uhr bis 18:00 Uhr.

c) Klimadaten für die Berechnungen

In Abhängigkeit von der nach Bild 1 [Hinweis: Verweis innerhalb Quelle] für das zu bewertende Gebäude zutreffenden Klimaregion sind als Klimarandbedingungen den Berechnungen die vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raum-

forschung zur Verfügung gestellten **Testreferenzjahre** (TRY) (2011) wie folgt zugrunde zu legen:

- Klimaregion A: Normaljahr TRY-Zone 2
- Klimaregion B: Normaljahr TRY-Zone 4
- Klimaregion C: Normaljahr TRY-Zone 12

d) Beginn der Simulationsrechnungen und Zeitraum für die Auswertung

Die Berechnungen sind für ein komplettes Jahr durchzuführen und beginnen am **1. Januar an einem Montag um 0:00 Uhr**.

Sowohl für Wohn- als auch für Nichtwohngebäude sind keine Feiertage und Ferienzeiten bei der Ermittlung des Übertemperaturgradstundenwertes zu berücksichtigen.

e) Interne Wärmeeinträge

Der mittlere interne Wärmeeintrag ist bezogen auf die jeweils betrachtete **Nettogrundfläche** für:

- Wohngebäude: 100 Wh/(m²d) und für
- Nichtwohngebäude: 144 Wh/(m²d)

Die als Tageswerte angegebenen Wärmeeinträge sind für die Berechnungen als **konstante** Wärmeeinträge während der in 8.4.2 b) [Hinweis: Verweis innerhalb Quelle] angegebenen Nutzungszeiten anzusetzen. Die Wärmeeinträge werden zu **100 % als konvektive** Wärmeeinträge behandelt.

f) Soll-Raumtemperatur für Heizzwecke (ohne Nachtabenkung)

- Wohngebäude: $\theta_{h,soll} \geq 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Nichtwohngebäude: $\theta_{h,soll} \geq 21 \text{ }^{\circ}\text{C}$

g) Grundluftwechsel

- Wohngebäude: $n = 0,5 \text{ h}^{-1}$

Der gegebene Luftwechsel ist im Tagesgang **konstant** anzusetzen, wenn weder die Bedingungen für erhöhte Taglüftung nach h) dieses Abschnitts noch die Bedingungen für erhöhte Nachtlüftung nach i) dieses Abschnitts erfüllt sind.

- Nichtwohngebäude:

- während der **Nutzungszeit** (7:00 Uhr bis 18:00 Uhr):
 $n = 4 A_G / V h^{-1}$ (5)
 Dabei ist
 A_G die Grundfläche in m²;
 V das Nettoraumvolumen, in m³.
 Der nach Gleichung (5) ermittelte Luftwechsel ist während der Nutzungszeit konstant anzusetzen, wenn die Bedingungen für erhöhte Taglüftung nach h) dieses Abschnitts nicht erfüllt sind.
- **außerhalb** der Nutzungszeit (18:00 Uhr bis 7:00 Uhr):
 $n = 0,24 h^{-1}$ (6)
 Dieser Luftwechsel ist außerhalb der Nutzungszeit konstant anzusetzen, wenn die Bedingungen für erhöhte Nachtlüftung nach i) dieses Abschnitts nicht erfüllt sind.

Der angesetzte Luftwechsel ist in Form von Tages- und Wochenprofilen zu dokumentieren.

h) Erhöhter Tagluftwechsel

Überschreitet die Raumlufttemperatur **23 °C** und liegt die Raumlufttemperatur **über der Außenlufttemperatur**, darf der mittlere Luftwechsel während der Aufenthaltszeit (Nichtwohngebäude 7:00 Uhr bis 18:00 Uhr; Wohngebäude 6:00 Uhr bis 23:00 Uhr) bis auf **$n = 3 h^{-1}$ erhöht** werden, um durch erhöhte Lüftung eine Überhitzung des Raumes zu vermeiden. Der gewählte Ansatz ist zu dokumentieren.

i) Nachtluftwechsel

Außerhalb der Aufenthaltszeit (Nichtwohngebäude 18:00 Uhr bis 7:00 Uhr; Wohngebäude 23:00 Uhr bis 6:00 Uhr)

- ist von dem Luftwechsel nach g) auszugehen, wenn **nicht** die Möglichkeit zur Nachtlüftung besteht;
- **darf** der Luftwechsel auf $n = 2 h^{-1}$ erhöht werden (**erhöhte** Nachtlüftung), wenn die Möglichkeit zur nächtlichen Fensterlüftung besteht;

Bei der Wohnnutzung darf in der Regel von der Möglichkeit zu erhöhter Nachtlüftung ausgegangen werden, wenn im zu bewertenden Raum oder Raumbereich die Möglichkeit zur nächtlichen Fensterlüftung besteht;

- darf der Luftwechsel auf $n = 5 h^{-1}$ erhöht werden (**hohe** Nachtlüftung), wenn für den zu bewertenden Raum oder Raumbereich die Möglichkeit besteht, **geschossübergreifende** Lüftungsmöglichkeiten (z. B. Lüftung

über angeschlossenes Atrium) zu nutzen, um den sich einstellenden Luftwechsel zu erhöhen;

- bei Einsatz einer Lüftungsanlage darf der erhöhte Nachtluftwechsel gemäß der Dimensionierung der Anlage angesetzt werden.

Der gewählte Ansatz ist zu dokumentieren. Für den Ansatz eines erhöhten oder hohen Nachtluftwechsels oder eines Nachtluftwechsels gemäß der Dimensionierung der Lüftungsanlage müssen die im Folgenden genannten **Temperaturrandbedingungen** gegeben sein:

$$\theta_{i,Luft} > \theta_{i,h,soll} \text{ UND } \theta_{i,Luft} > \theta_e \quad (7)$$

Dabei ist

- $\theta_{i,Luft}$ die Innentemperatur;
- $\theta_{i,h,soll}$ die Raum-Solltemperatur für Heizzwecke (Wohngebäude 20 °C; Nichtwohngebäude 21 °C)
- θ_e die Außenlufttemperatur

Wird in den Simulationsrechnungen die erhöhte oder hohe Nachtlüftung berücksichtigt, so ist ein Sonnenschutz vorzusehen, mit dem $g_{tot} \leq 0,4$ erreicht wird!

j) Steuerung Sonnenschutz

Sind zur geplanten Betriebsweise einer Sonnenschutzvorrichtung keine Steuer- bzw. Regelparameter bekannt, so ist im Fall einer **automatischen** Sonnenschutzsteuerung für die Berechnungen von einer strahlungsabhängigen Steuerung für Nord-, Nordost- und Nordwestorientierte Fenster mit einer **Grenzbestrahlungsstärke** von 200 W/m² (Wohngebäude) bzw. 150 W/m² (Nichtwohngebäude) und für alle anderen Orientierungen mit einer Grenzbestrahlungsstärke von 300 W/m² (Wohngebäude) bzw. 200 W/m² (Nichtwohngebäude) (Summe aus Direkt- und Diffusstrahlung, außen vor dem Fenster) pro Quadratmeter Fensterfläche auszugehen.

Bei **nicht-automatischer** Sonnenschutzsteuerung erfolgt bei Nichtwohngebäuden keine Aktivierung am Wochenende (Samstag und Sonntag). Grundsätzlich ist für die Berechnungen von einer windunabhängigen Betriebsweise auszugehen.

Wird planerisch eine hiervon abweichende Betriebsweise der Sonnenschutzvorrichtung vorgesehen, so **darf** diese in der Simulationsrechnung verwendet werden. Die Betriebsweise ist zu dokumentieren.

k) Wärmeübergangswiderstände

Die Wärmeübergangswiderstände dürfen, wie für den Winterfall, konstant nach DIN EN ISO 6946:2008-04, Tabelle 1, angesetzt werden; davon abweichende Ansätze sind zu dokumentieren.

l) Bauliche Verschattung

Bauliche Verschattung **darf** berücksichtigt werden. Der gewählte Ansatz ist zu dokumentieren.

m) Passive Kühlung

Eine passive Kühlung **darf** berücksichtigt werden. Der gewählte Ansatz ist zu dokumentieren.

12.3 Ausgabe/Ergebnis Simulation

- **operativen Innentemperaturen** in Abhängigkeit von den drei Sommer-Klimaregionen (A, B und C)
- **Übertemperaturgradstunden** je nach Bezugswert abhängig von Klimaregion
 - Sommerklimaregion A (Rostock) $\theta_{b,op} = 25^{\circ}\text{C}$
 - Sommerklimaregion B (Potsdam) $\theta_{b,op} = 26^{\circ}\text{C}$
 - Sommerklimaregion C (Mannheim) $\theta_{b,op} = 27^{\circ}\text{C}$
- Gemäß DIN 4108-2 Abschnitt 8.4.1 gilt: "In Abhängigkeit von der Nutzungsart wird die übliche Anwesenheitszeit (Wohnnutzung 24 h/d; Nichtwohnnutzung Montag bis Freitag 7 Uhr bis 18 Uhr) als Bezugszeit für den zu bestimmenden Übertemperaturgradstundenwert zugrunde gelegt."
- Zusätzlich dürfen im Rahmen der Dokumentation **informativ** die **Überschreitungshäufigkeiten** der Bezugstemperatur $\theta_{b,op}$ und $\theta_{b,op} + 2\text{ K}$ und $\theta_{b,op} + 4\text{ K}$ ausgewiesen werden.

1 3 Anhang: Randbedingungen DIN V 18599

Die Nutzungsrandbedingungen der DIN V 18599-10 enthalten nur einen Tageswert für die Nutzungszeit. Um vergleichbare Randbedingungen zu erhalten, ist diesem Tageswert ein Tagesgang zuzuordnen, welcher für die Simulationsrechnungen herangezogen werden kann.

13.1 Wärmebrücken - DIN V 18599-2

Das Berechnungsverfahren der DIN V 18599-2 sieht i.d.R. eine pauschale Berücksichtigung der Wärmebrücken über den Wärmebrückenzuschlag ΔU_{WB} vor, neben der Möglichkeit der detaillierten Berechnung. Die pauschalen Werte liegen zwischen $\Delta U_{WB} = 0,05$ (optimierte Ausführung nach Norm) über 0,10 (allgemein) bis 0,15 (Problematik bei Innendämmung) W/m^2K . Durch die für 2016 geplante Neuausgabe der DIN V 18599-2 kann der Pauschalwert für die normgemäße Ausführung auf einen Wert von $\Delta U_{WB} = 0,03 W/(m^2K)$ abgesenkt werden.

In den Simulationsmodellen werden i.d.R. nur Raummodule abgebildet, welche nur einen kleinen Ausschnitt der wärmetauschenden Gebäudehülle abbilden. Der Effekt der Wärmebrücken und der Güte ihrer Ausführung wird nicht explizit modelliert, sondern ist implizit in der Variation des Wärmeschutzniveaus (U-Werte der verschiedenen Bauteile) enthalten.

13.2 Luftwechsel - DIN V 18599-2

In der Bilanz nach DIN V 18599-2 werden bei der Bestimmung der Lüftungswärmequellen und -senken für den Luftwechsel Tagesmittelwerte angesetzt. Für die Simulationsrechnungen werden jedoch Tagesgänge benötigt und die Betriebsweise am Wochenende ist zu definieren. Ein möglicher Ansatz dazu findet sich in DIN 4108-2.

In Abschnitt 8.4.2 der DIN 4108-2 (Nachweis sommerlicher Wärmeschutz) sind die für thermische Gebäudesimulationsrechnungen anzusetzende Berechnungsrandbedingungen definiert. Dort werden für Simulationen die Randbedingungen der Büronutzung (DIN V 18599-10 Einzelbüro) angesetzt, d.h. ein Mindestaußenluftvolumenstrom von $\dot{V}_A = 4 m^3/(h m^2)$ während der Nutzungszeit von 7:00 bis 18:00 Uhr an 250 Tagen im Jahr (Montag-Freitag). Für das Einraummodul (Nettogrundfläche $A_{NGF} = 19,8 m^2$, Nettovolumen $V = 55,4 m^3$) ergibt dies einen Luftwechsel von $n = \dot{V}_A A_{NGF}/V = 1,43 h^{-1}$.

Außerhalb der täglichen Nutzungszeit und am Wochenende wird nur der Infiltrationsluftwechsel angesetzt, welcher gemäß DIN V 18599-2 vereinfacht mit $n_{inf} = n_{50} e = 0,14 h^{-1}$ angesetzt werden kann (Vereinfachungen: keine Außenluftdurchlässe, Gebäude ohne raumluftechnische Anlage mit Dichtheitsprüfung $n_{50} = 2 h^{-1}$, Windexposition mittlere Abschirmung $e = 0,07$).

13.3 Saisonaler Fensterluftwechsel bei Wohnnutzung - DIN V 18599-2

Mit der Neuausgabe der Norm wurde für Wohngebäude ein saisonaler Luftwechsel eingeführt, welcher den Jahresgang des Fensterluftwechsels abbilden soll. Die Berücksichtigung erfolgt über den Faktor $f_{win,seasonal}$ zur saisonalen Anpassung des Fensterluftwechsels, welcher als Funktion der monatlichen Außenlufttemperatur θ_e definiert ist und auf den mittleren täglichen Fensterluftwechsel n_{win} wirkt.

$$\text{Faktor saisonale Fensterlüftung } f_{win,seasonal} = 0,04 \theta_e + 0,8 \quad (12)$$

Informationen zu Hintergrund, Grundlagen und Herleitung des Anpassungsfaktors sind in [14] enthalten. Den Jahresgang des Anpassungsfaktors (Ordinate links) sowie der angepasste Fensterluftwechsel (Ordinate rechts) ist in der folgenden Abbildung graphisch aufgetragen für die Klimadaten des Standorts Potsdam (Referenzstandort Deutschland).

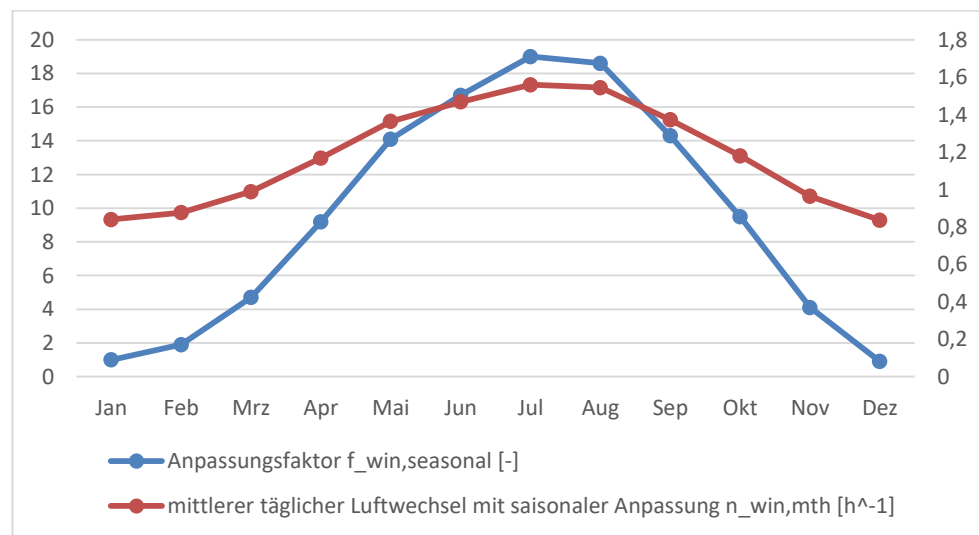


Bild 39: Jahresgang Anpassungsfaktor und saisonal angepasster Fensterluftwechsel bei Wohngebäuden.

13.4 Steuerung Sonnenschutz - DIN V 18599-2

Bezüglich der Berücksichtigung des Sonnenschutzes unterscheidet DIN V 18599-2 drei verschiedenen Fälle, d.h. Systeme ohne Sonnenschutz sowie mit feststehendem oder variablem Sonnenschutz. Bei letzterem werden rechnerisch zwei Zustände differenziert, d.h. Zeitanteile mit aktiviertem Sonnenschutz und Zeitanteile ohne, wofür der Parameter a eingeführt wurde.

Der Parameter a zur Bewertung der Aktivierung der Sonnenschutzvorrichtung liegt im Anhang der DIN V 18599-2 tabelliert für manuell- oder zeitgesteuerte sowie strahlungsabhängig geregelte Systeme vor. Beim manuellen Betrieb wird davon ausgegangen, dass eine Steuerung nur während der Nutzungszeit statt-

findet. Die Tabellenwerte sind für verschiedene Orientierungen und Flächenneigungen angegeben und repräsentieren mittlere Klimaverhältnisse in Deutschland. In der nachfolgenden Abbildung sind die Werte für senkrechte Flächen angegeben, wobei jeweils das Winter- und Sommerhalbjahr unterschieden wird.

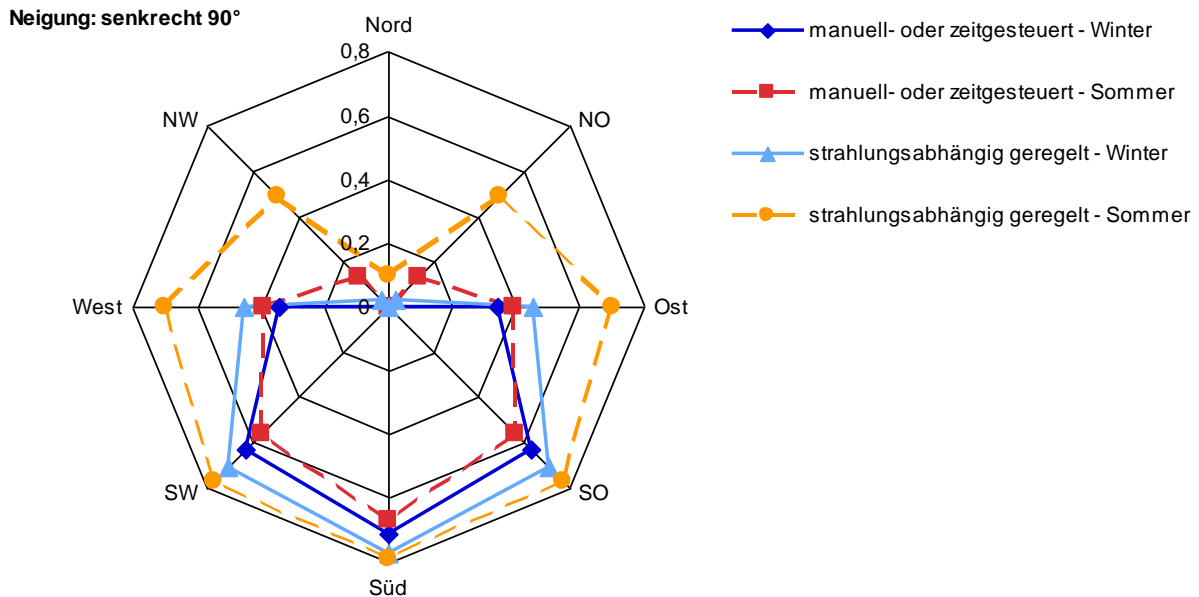


Bild 40: Parameter a zur Bewertung der Aktivierung beweglicher Sonnenschutzvorrichtungen für senkrechte Flächen aufgetragen für verschiedene Orientierungen und Steuerungsarten jeweils für Winter und Sommer.

Der Parameter liegt je nach Orientierung, Neigung und Steuerung zwischen 0 und 0,9, bei Südorientierung ergibt sich als Maximalwert für senkrechte Flächen bei einer strahlungsabhängigen Regelung im Sommer ein Wert von 0,79, d.h. der Sonnenschutz wird für ca. 80% der Zeit mit Tageslicht als aktiviert angesehen, es gilt g_{tot} , für die restliche Zeit gilt g_{senkr} .

Die Bestimmung des Parameters basiert auf Simulationsrechnungen, denen als Randbedingungen u.a. eine Verkehrszeit von 9h/d und eine Grenzbestrahlungsstärke von 300 W/m² zugrunde liegen. Die als Stundenwerte ausgegebenen Simulationsergebnisse wurden dabei zu Monatswerten aufsummiert. Die Auswertung der simulierten Daten hat gezeigt [13], dass mit hinreichender Genauigkeit der Jahresgang in einem Wert für das Winterhalbjahr (Oktober bis März) und einem Wert für das Sommerhalbjahr (April bis September) abgebildet werden kann. Der Bewertungsfaktor a wurde dabei mittels linearer Regression ermittelt.

13.5 Bauart (wirksame Wärmespeicherfähigkeit) - DIN V 18599-2

[Hinweis: der Text entspricht dem Text der Norm.]

Die wirksame Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} ist nach DIN EN ISO 13786 zu berechnen.

In der Regel ist das vereinfachte Verfahren nach DIN EN ISO 13786:2008-04, Anhang A, zu verwenden (10 cm-Regel). Für Bauteile mit thermisch abgedeckten Speichermassen (z. B. aufgeständerte Fußböden

oder abgehängte Decken) ist das ausführliche Verfahren zu wählen.

Falls Mobiliar und/oder stationäre Einrichtungsgegenstände (z.B. Bücher in Bibliotheken, schwere Maschinen usw.) das Speicherverhalten des Raumes erheblich beeinflussen, sind diese als Innenbauteile zu behandeln.

Vereinfacht dürfen folgende auf die Bezugsfläche A_B bezogene Pauschalwerte nach den Gleichungen (133) bis (135) verwendet werden. Dies ist im Bericht gesondert anzugeben.

Für leichte Gebäudezonen: $C_{\text{wirk}} = 50 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \text{ K}) A_B$ (133)

Für mittelschwere Gebäudezonen: $C_{\text{wirk}} = 90 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \text{ K}) A_B$ (134)

Für schwere Gebäudezonen: $C_{\text{wirk}} = 130 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \text{ K}) A_B$ (135)

Einstufung der Bauschwere:

Als Standardwert gilt der Wert für leichte Gebäudezonen.

Als "mittelschwer" sind Gebäudezonen mit folgenden Eigenschaften einzustufen:

- Stahlbetondecke
- massive Innen- und Außenbauteile (mittlere Rohdichte $\geq 600 \text{ kg/m}^3$);
- keine abgehängten oder thermisch abgedeckten Decken;
- keine innenliegende Wärmedämmung an den Außenbauteilen;
- keine hohen Räume ($> 4,5 \text{ m}$, z. B. Turnhallen, Museen usw.).

Als "schwer" sind Gebäudezonen mit folgenden Eigenschaften einzustufen:

- Stahlbetondecke
- massive Innen- und Außenbauteile (mittlere Rohdichte $\geq 1600 \text{ kg/m}^3$);
- keine abgehängten oder thermisch abgedeckten Decken;

- keine innenliegende Wärmedämmung an den Außenbauteilen;
- keine hohen Räume (> 4,5 m, z. B. Turnhallen, Museen usw.);
- Hallengebäude (wenn Einrichtungsgegenstände oder Lagergüter mit hoher thermischer Speicherfähigkeit vorhanden sind), z.B. Logistikhallen.

13.6 Nutzungsprofile - DIN V 18599-10

In DIN V 18599-10 [15] sind Nutzungsrandbedingungen aufgeführt, die als Richtwerte bei energetischen Bewertungen von Gebäuden zugrunde gelegt werden können, sofern keine genaueren Angaben bekannt sind. Für Berechnungen im Rahmen von Nachweisverfahren sind diese Richtwerte obligatorisch. Die Randbedingungen sind getrennt für Wohn- und Nichtwohnnutzung definiert.

Bei der Wohnnutzung werden Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser unterschieden. Die folgende Aufstellung gibt wieder, welche Parameter in den Nutzungsprofilen enthalten sind.

- Temperaturen (Sollwerte, Nachtabsenkung, Auslegung),
- Nutzungs- und Betriebszeiten (Nutzung, Heizung, Wohnungslüftung),
- Trinkwarmwasserwärmebedarf,
- Mindestaußenluftwechsel,
- Gebäudeautomation und
- Korrekturfaktoren (Teilbeheizung, Verschmutzung).

Seit der Ausgabe 2011 der Norm ist bei den Randbedingungen auch für Wohngebäude der Kühlfall mit berücksichtigt.

Für die Nichtwohnnutzung sind die Profile für 43 unterschiedliche Nutzungsarten definiert. Die dabei festgelegten Parameter umfassen

- Nutzungs- und Betriebszeiten (Nutzung, Nutzung bei Tageslicht, Heizung, Kühlung, Raumluftechnik),
- Beleuchtung (Beleuchtungsstärke, Nutzebene, Abwesenheit, Geometrie, diverse Faktoren),

- Raumklima (Solltemperaturen, Temperaturabsenkung, Auslegungstemperaturen, Feuchteanforderung, Mindestaußenluftvolumenstrom, Gebäudeautomation, Abwesenheit, Teilbetrieb) und
- Wärmequellen.

13.7 Klimadaten - DIN V 18599-10

Als Randbedingungen für die Bilanzierung des Heizwärme- und Kühlkältebedarfs stehen in DIN V 18599-10 [15] Klimadaten zur Verfügung, die einem repräsentativen deutschen Klima entsprechen. Neben der Außenlufttemperatur (Monatsmittelwert) sind die mittleren monatlichen Strahlungsintensitäten angegeben. Darüber hinaus sind Auslegungsdaten für die Bestimmung der maximalen Heiz- und Kühlleistung definiert.

Bei der Bilanzbildung ebenfalls ausschlaggebend und standortabhängig sind Parameter

- der Bewertung der Aktivierung beweglicher Sonnenschutzvorrichtungen (DIN V 18599-2)
- zur Berücksichtigung der Verschattung, d.h. Teilbestrahlungsfaktoren bei baulicher Verschattung (DIN V 18599-2)
- zur Bewertung der Tageslichtversorgung, d.h. tabellierte Kennwerte (DIN V 18599-4)

1 4 Anhang: Nutzungsrandbedingungen DIN V 18599-10 Ausgabe 2016-10.

Hinweise dazu:

- Für die Zeiten des reduzierten Betriebs an Wochenenden und Ferien ist kein Mindestaußenluftvolumenstrom zu berücksichtigen.
- Für die Zeiten des reduzierten Betriebs an Wochenenden und Ferien sind keine Wärmequellen aus Personen und Arbeitshilfen zu berücksichtigen.

Tabelle 28: Randbedingungen (vollständig) der für die Variationsrechnungen herangezogenen Nutzungsprofile. Quelle DIN V 18599-10 Ausgabe 2016-10.

1	Lfd.-Nr.			2	4	8	21		
2	Nutzungen			Gruppenbüro (zwei bis sechs Arbeitsplätze)	Besprechung, Sitzung, Seminar	Klassenzimmer (Schule), Gruppenraum (Kindergarten)	Rechenzentrum	Einfamilienhaus EFH	Mehrfamilienhaus MFH
3	Nutzung Beginn	-	Uhr	7:00	7:00	8:00	0:00	0:00	0:00
4	Nutzung Ende	-	Uhr	18:00	18:00	15:00	24:00	24:00	24:00
5	tägliche Nutzungsstunden	$t_{nutz,d}$	h/d	11	11	7	24	24	24
6	jährliche Nutzungstage	$d_{nutz,a}$	d/a	250	250	200	365	365	365
7	jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit	t_{Tag}	h/a	2543	2543	1400	4407	-	-
8	jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit	t_{Nacht}	h/a	207	207	0	4353	-	-
9	tägliche Betriebsstunden RLT und Kühlung	$t_{v,op,d}$	h/d	13	13	9	24	24	24
	tägliche Betriebsstunden RLT und Kühlung Beginn	-	Uhr	5:00	5:00	6:00	0:00	0:00	0:00
	tägliche Betriebsstunden RLT und Kühlung Ende	-	Uhr	18:00	18:00	15:00	24:00	24:00	24:00
10	jährliche Betriebstage für jeweils RLT, Kühlung und Heizung	$d_{op,a}$	d/a	250	250	200	365	365	365
11	tägliche Betriebsstunden Heizung	$t_{h,op,d}$	h/d	13	13	9	24	17	17
	tägliche Betriebsstunden Heizung Beginn	-	Uhr	5:00	5:00	6:00	0:00	6:00	6:00
	tägliche Betriebsstunden Heizung Ende	-	Uhr	18:00	18:00	15:00	24:00	23:00	23:00
12	Wartungswert der Beleuchtungsstärke	E_m	lx	500	500	300	500	-	-
13	Höhe der Nutzebene	h_{Ne}	m	0,8	0,8	0,8	0,8	-	-
14	Minderungsfaktor Bereich Sehaufgabe	k_A	-	0,92	0,93	0,97	0,96	-	-
15	Relative Abwesenheit	C_A	-	0,3	0,5	0,25	0,5	-	-
16	Raumindex	k	-	1,25	1,25	2	1,5	-	-
17	Teilbetriebsfaktor der Gebäudebetriebszeit für Beleuchtung	F_t	-	0,7	1	0,9	0,5	-	-
18	Anpassungsfaktor zur Beleuchtung vertikaler Flächen	k_{VB}	-	1	1	1	1	-	-

Tabelle 28 fortgesetzt.

1	Lfd.-Nr.			2	4	8	21		
2	Nutzungen			Gruppenbüro (zwei bis sechs Arbeitsplätze)	Besprechung, Sitzung, Seminar	Klassenzimmer (Schule), Gruppenraum (Kindergarten)	Rechenzentrum	Einfamilienhaus EFH	Mehrfamilienhaus MFH
19	Raum-Solltemperatur Heizung	$\theta_{i,h,soll}$	°C	21	21	21	21	20	20
20	Raum-Solltemperatur Kühlung	$\theta_{i,c,soll}$	°C	24	24	24	24	25	25
21	Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb	$\Delta\theta_{i,NA}$	K	4	4	4	4	4	4
22	Minimaltemperatur Auslegung Heizung	$\theta_{i,h,min}$	°C	20	20	20	20	20	20
23	Maximaltemperatur Auslegung Kühlung	$\theta_{i,c,max}$	°C	26	26	26	26	26	26
24	Feuchteanforderung (mit Toleranz m. T.; ohne Toleranz o. T.; keine Anforderung -)	-	-	m. T.	m. T.	m. T.	-	-	-
25	Mindestaußenluftvolumenstrom	V'_A	m³/(h m²)	4	15	10	1,3	-	-
26	Mindestaußen- Volumenstrom für Gebäude (Klasse II Schadstoffarm DIN EN 15251)	$V'_{A,Geb}$	m³/(h m²)	2,5	2,5	2,5	-	-	-
27	Relative Abwesenheit RLT	C_{RLT}	-	0,3	0,5	0,25	-	-	-
28	Teilbetriebsfaktor der Gebäudebetriebszeit RLT	F_{RLT}	-	0,7	0,5	0,9	-	-	-
29	Personen	q_{Lp}	Wh/(m²d)	30	93	100	14	-	-
	maximale Belegungsdichte: gering	-	m²/Person	18	4	3,5	40	-	-
	maximale Belegungsdichte: mittel	-	m²/Person	14	3	3	30	-	-
	maximale Belegungsdichte: hoch	-	m²/Person	10	2	2,5	20	-	-
	sensible Wärmeabgabe je Person	-	W/Person	70	70	60	70	-	-
	Vollnutzungsstunden	-	h/d	6	4	5	6	-	-
	max. spezifische Leistung: tief	-	W/m²	3,9	17,5	17,1	1,8	-	-
	max. spezifische Leistung: mittel	-	W/m²	5	23,3	20	2,3	-	-
	max. spezifische Leistung: hoch	-	W/m²	7	35	24	3,5	-	-
30	Arbeitshilfen	q_{Lfac}	Wh/(m²d)	43	8	20	1800	-	-
	Vollnutzungsstunden	-	h/d	6	4	5	6	-	-
	max. spezifische Leistung: tief	-	W/m²	2,8	1	2	50	-	-
	max. spezifische Leistung: mittel	-	W/m²	7,1	2	4	150	-	-
	max. spezifische Leistung: hoch	-	W/m²	15	3	6	500	-	-

Tabelle 28 fortgesetzt.

1	Lfd.-Nr.			2	4	8	21		
2	Nutzungen			Gruppenbüro (zwei bis sechs Arbeitsplätze)	Besprechung, Sitzung, Seminar	Klassenzimmer (Schule), Gruppenraum (Kindergarten)	Rechenzentrum	Einfamilienhaus EFH	Mehrfamilienhaus MFH
Richtwerte	Minderungsfaktor infolge Verschmutzung	F_V	-	0,9	0,9	0,9	0,9	1	1
	Verschmutzungsfaktor	k_2	-	0,9	0,9	0,9	0,9	-	-
	Summand Automation	$\Delta\theta_{EMS}$	-	0	0	0	0	0	0
	Faktor adaptives Aufheizen	f_{adapt}	-	1	1	1	1	1	1
Wohnnutzung	Anteil der mitbeheizten Fläche an der Gesamtfläche	a_{ib}	-	-	-	-	-	0,25	0,15
	Wärmequellen Wohngebäude (Bezug A_{NGF})	q_I	Wh/(m²d)	-	-	-	-	45	90
	Betrieb Wohnungslüftungsanlage WLA	-	-	-	-	-	-	Heizzeit	Heizzeit
	nutzungsbedingter Mindestaußenluftwechsel nicht bedarfsgeführt	n_{nutz}	h ⁻¹	-	-	-	-	0,5	0,5
	nutzungsbedingter Mindestaußenluftwechsel bedarfsgeführt ^{e)}	n_{nutz}	h ⁻¹	-	-	-	-	0,45	0,45
	Heizung Nachtbetrieb	-	-	-	-	-	-	Ab-schal-tung	Ab-sen-kung

e) Nur in Verbindung mit einer ventilatorgestützten Zu- und Abluftanlage oder Abluftanlage mit geeigneter nutzerunabhängiger Führungsgröße wie z. B. Feuchte oder CO₂, jedoch ohne Betriebsunterbrechung.

1 5 Anhang: Weitere Quellen für Randbedingungen

Dieser Abschnitt enthält eine Auswahl weiterer möglicher Quellen (Normen und Richtlinien) zur Festlegung von Randbedingungen. Die einzelnen Texte enthalten eine kurze und grobe Zusammenfassung der Inhalte der jeweiligen Quelle.

15.1 DIN 4108-4 : 2013-02

Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische **Bemessungswerte** [16].

*Diese Norm legt **wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte** für Baustoffe fest, darunter werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe, Fenster, Dachoberlichter und Verglasungen und Mauerwerk, siehe Anhang A, und sonstige gebräuchliche Stoffe für die Berechnung des Wärmeschutzes und der Energie-Einsparung in Gebäuden. Produkte werden mit dem Nennwert gekennzeichnet. Zusätzlich enthält diese Norm in Abschnitt 8 Umrechnungstabellen zur Erfüllung der Anforderungen an die Dämmung von Rohrleitungen.*

15.2 DIN EN 12831 : 2003-08

Heizungsanlagen in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-**Heizlast** [17].

DIN EN 12831-1 : 2008-07 .. Nationaler Anhang

DIN EN 12831-1 : 2010-11 Berichtigung 1 .. Nationaler Anhang

DIN EN 12831-2 : 2012-05 .. **Vereinfachtes Verfahren** zur Ermittlung der Gebäude-Heizlast und der Wärmeerzeugerleistung

Anhang C (informativ) **Beispielrechnung** für die Norm-Heizlast

Anhang D (normativ) **Anhaltswerte** zu den Berechnungen nach den Abschnitten 6 bis 9

15.3 DIN EN 13779 : 2007-09 (DIN SPEC 2009-12 Nationaler Anhang)

Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlsysteme [18].

Diese Norm bietet Planern, Gebäudeeigentümern und Nutzern Leitlinien für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen, um bei akzeptablen Installations- und Betriebskosten ein zu allen Jahreszeiten behagliches und gesundheitlich unbedenkliches Innenraumklima zu schaffen.

6 Klassifizierung: ETA, ODA, IDA, PC, SFP

7 Raumklima

15.4 DIN EN 15251 : 2012-12

Eingangsparameter für das **Raumklima** zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumlufthqualität, Temperatur, Licht und Akustik [19].

vorn: Nationaler Anhang NA (informativ) Nationale Ergänzungen und Hinweise zur Anwendung dieser Europäischen Norm

Anhang A (informativ) Empfohlene **Kriterien** für das thermische Raumklima

Anhang B (informativ) **Basis** für die Kriterien der Raumlufthqualität und der Lüftungsraten

Anhang D (informativ) Empfohlene Kriterien für die **Beleuchtung**

Anhang I (informativ) **Beispiele** für die Klassifizierung und Zertifizierung des Raumklimas

15.5 DIN EN ISO 10456 : 2010-05

Baustoffe und Bauprodukte - Wärme- und feuchtetechnische **Eigenschaften** - Tabellierte **Bemessungswerte** und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte [20].

Diese Internationale Norm legt Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte von wärmetechnisch homogenen Baustoffen und -produkten fest und enthält Verfahren zur Umrechnung von Werten, die unter einem Satz von Bedingungen erhalten wurden, in solche Werte, die für einen anderen Satz von Bedingungen gelten.

15.6 DIN EN ISO 13370 : 2008-04 (Entwurf 2015-06)

Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Wärmeübertragung über das **Erdreich** - Berechnungsverfahren [21].

Diese Internationale Norm gibt Verfahren zur Berechnung von Wärmeübertragungskoeffizienten und der Wärmeübertragung durch Bauteile an, die sich in wärmetechnischem Kontakt mit dem Erdreich befinden, einschließlich Bodenplatten auf Erdreich, aufgeständerter Bodenplatten und Kellergeschossen.

7 **Wärmedurchgangskoeffizient** und Wärmestrom

8.1 Charakteristisches Bodenplattenmaß

Anhang A (normativ) Berechnung des **Wärmestromes** über das Erdreich: monatlich

Anhang B (normativ) Bodenplatten auf Erdreich mit **Randdämmung**

Anhang C (normativ) Wärmeströme für einzelne Räume

Anhang D (normativ) Anwendung auf dynamische **Simulationsprogramme** zur Berechnung Innenraumtemperatur

Anhang E (normativ) Belüftung unter aufgeständerten Bodenplatten

Anhang F (informativ) Harmonische thermische Leitwerte

Anhang G (informativ) Wärmetechnische **Eigenschaften** des Erdreichs

Anhang H (informativ) Einfluss von **fließendem Grundwasser**

Anhang I (informativ) Erdberührte Bodenplatte mit eingebettetem **Heizungssystem**

Anhang J (informativ) **Kühlräume**

Anhang K (informativ) Praktische **Beispiele**

15.7 DIN EN ISO 13789 : 2008-04 (Entwurf 2015-06)

Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Spezifischer **Transmissions- und Lüftungswärmedurchgangskoeffizient** - Berechnungsverfahren [22].

*Diese Internationale Norm legt ein Verfahren zur Berechnung des **stationären** spezifischen Transmissions- und des stationären spezifischen Lüftungswärmedurchgangskoeffizienten von vollständigen Gebäuden und Gebäudeteilen fest und liefert die entsprechenden Vereinbarungen.*

*Anhang A legt ein **stationäres** Verfahren zur Berechnung der **Temperatur** in unbeheizten Räumen, die an beheizte Räume angrenzen fest.*

4.2 Grenzen des konditionierten Raumes

6 Spezifischer Transmissionswärmedurchgangskoeffizient **durch** unkonditionierte Räume

Tabelle 2 - Übliche **Luftwechselraten** zwischen unkonditioniertem Raum und Außenumgebung

Anhang A (normativ) **Temperatur** im unkonditioniertem Raum

Anhang B (informativ) Informationen zu den **Arten der Maße**

Anhang C (informativ) **Luftvolumenströme** bei Lüftung

15.8 DIN EN ISO 13791 : 2012-08

Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik - Allgemeine **Kriterien** und **Validierungsverfahren** [23].

4.5.2 Konvektive **Wärmeübertragung**: Koeffizienten, Berechnung, Luftschichten

4.5.3 Wärmeübertragungsvorgänge durch **kurzwellige Strahlung**: Absorptionsgrade, Sonnenschutz

4.5.4 Wärmeübertragung durch **langwellige Strahlung**: Berechnung, Wärmestrom

8 Validierungsverfahren

Anhang C (informativ) Verschattung durch **Auskragungen** und Seitenteile: *Dieser Anhang gibt ein Verfahren zur Bestimmung der verschatteten Fläche eines Bauteils bei Vorhandensein von Hindernissen in Form von Auskragungen und Seitenteilen an.*

Anhang H (informativ) **Innere Wärmegewinne**: *Dieser Anhang gibt typische Werte für den Wärmestrom durch innere Energiequellen für Wohn- und Nicht-Wohngebäude an. (4 einfache Tabellen Wohn- und Nichtwohnnutzung).*

Anhang I (informativ) **Lüftung**: *Dieser Anhang enthält ein Verfahren zur Ermittlung des Luftvolumenstroms infolge natürlicher Lüftung durch die Öffnungen eines Gebäudes. Er kann angewendet werden, wenn keine Norm zu einem ausführlichen Modell vorhanden ist, das auf der Luftmassenbilanz beruht.*

Anhang K (informativ) Berechnungsverfahren für die **innere Feuchte** ohne Feuchteabsorption oder -desorption durch Wände u. a.: *Dieser Anhang enthält das Berechnungsverfahren für die innere Feuchte unter der Bedingung, dass Wände u. a. keine Feuchte ab- oder desorbieren. Ab- und Desorption durch Wände u. a. sind nicht immer vernachlässigbar, insbesondere dann, wenn der Umfang der Lüftung gering ist. In vielen Fällen wird jedoch bei einer Berechnung, die die Ab- oder Desorption der Feuchte nicht berücksichtigt, die Feuchteänderung(samplitude) überschätzt. Dies ermöglicht eine konservative Ermittlung der inneren Feuchte.*

15.9 DIN EN ISO 13792 : 2012-08

Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Berechnung von sommerlichen Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik - Vereinfachtes Berechnungsverfahren [24].

4.2.2 Wärmeübergangskoeffizienten

6 Validierungsverfahren

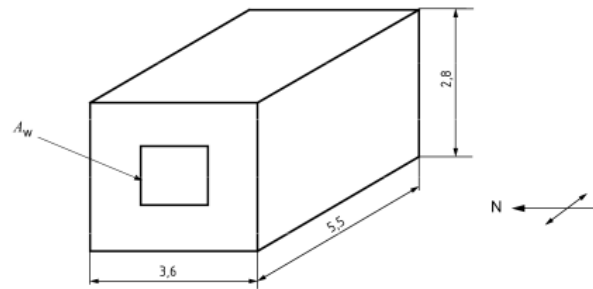


Bild 1 — Raumgeometrien A und B

6.2.3 Beschreibung der Elemente: *Die thermophysikalischen Merkmale der Wände, der Decke und des Fußbodens sind in Tabelle 4 angegeben. Die thermophysikalischen Eigenschaften der Glasscheiben, die das Verglasungssystem bilden, sowie des außenliegenden Sonnenschutzes sind in Bild 2 angegeben.*

Anhang E (informativ) Berechnungsbeispiele

15.10 DIN EN ISO 13786 : 2008-04 (Entwurf 2015-06)

Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen - **Dynamisch**-thermische Kenngrößen - Berechnungsverfahren [25].

Diese Norm legt die Kenngrößen fest, die mit dem dynamisch-thermischen Verhalten von kompletten Bauteilen in Beziehung stehen und gibt Verfahren für ihre Berechnung an. Sie legt weiterhin fest, welche Informationen über die Baustoffe für die Anwendung des Bauteils erforderlich sind.

3.1.1.4 harmonischer thermischer Leitwert L_{mn}

4 Periodendauer der thermischen Schwankungen

6 Übergangsmatrix eines mehrschichtigen Bauteils

7 Dynamisch-thermische Kenngrößen

Anhang A (normativ) Vereinfachte Berechnung der **wirksamen Wärmekapazität**: *Die im Folgenden beschriebenen vereinfachten Verfahren gelten nur für ebene Bauteile. Sie beruhen auf der **Eindringtiefe** einer Wärmewelle, die für den an die Oberfläche angrenzenden Stoff berechnet wird (siehe Gleichung (11)).*

A.2.4 Verfahren der wirksamen Dicke

B.2 Anwendungsbeispiele

Anhang C (informativ) Hinweise für die Computerprogrammierung

Anhang D (informativ) Beispiele

15.11 DIN EN ISO 6946 : 2008-04 (Entwurf 2015-06)

Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren [26].

Wärmeübergänge, Luftschichten, Berechnung **Wärmedurchgangskoeffizient**, homogene und inhomogene Bauteile

Anhang A (normativ) **Wärmeübergangswiderstand**: Berechnung

Anhang B (normativ) Wärmedurchlasswiderstand von **Lufträumen**

Anhang C (normativ) Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Bauteilen und **keilförmigen** Schichten

Anhang D (normativ) Korrekturen des Wärmedurchgangskoeffizienten: Luftspalte, Befestigungselemente, Umkehrdächer

15.12 VDI 2078 : 2015-06

Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation) [27].

5 Verwendung **meteorologischer** Daten: TRY, Höhen-/Stadtkorrektur, Strahlungsmodell, Tageslicht

6 Gebäude: z.B. Rahmenanteil, Zonierung, Zeitprofile, innere Wärme-/Feuchtequellen, Verwendung von Angaben der **DIN V 18599** für die Kühllastberechnung mit Berechnungsbeispiel, Infiltration/Fensterlüftung

7 Berechnungsgrundlagen: 7.1 Randbedingungen, 7.2 Raummodell, 7.3 Definition der Einschwingperioden, 7.4.1 Einfluss des Regelungskonzepts auf die Raumkühlleistung

8 Testbeispiele

9 Validierung

Anhang B Kennwerte

Anhang C Testbeispiele: Bauteilaufbauten

15.13 VDI 6007-1 : 2007-10

Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden - Raummodell [28].

*Das in dieser Richtlinie beschriebene Verfahren dient als **Grundlage für Berechnungen** des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden.*

5 Verwendung **meteorologischer** Daten: DIN 4710 und VDI 4710-1, Testreferenzjahr, Auslegungstage

6 Gebäude und Räume: *Die Beschreibung von Gebäude und Räumen erfolgt nach Richtlinie VDI 6020 Blatt 1, Abschnitt 6.1. Dabei gilt für die Bauteilgeometrie, Stoffdaten und thermische Randbedingungen die Richtlinie VDI 6021.*

7 Modellbildung: 7.2 Randbedingungen, 7.3 Thermisches Verhalten der Bauteile, 7.4 Thermisches Verhalten des Raums (Berechnungsverfahren, Validierung, Testbeispiele)

Anhang: Testbeispiele, Diagramme, Ablaufplan

15.14 VDI 6007-2 : 2012-03

Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden - Fenstermodell [29].

U.a.: *Berechnung des Gesamtenergiedurchlassgrads transparenter Bauteile.*

15.15 VDI 6007-3 : 2015-06

Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden - Modell der solaren Einstrahlung [30].

U.a.: *Berechnung der kurzwelligen, direkten und diffusen Einstrahlung auf horizontale, aber auch auf beliebig orientierte und geneigte Bauteile sowie die Durchstrahlung transparenter Bauteile (einschließlich Sonnenschutz) auf der Basis des Gesamtenergiedurchlassgrads (Strahlungsmodell).*

15.16 VDI 6020-1 : 2001-05

Anforderungen an Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation Gebäudesimulation [31].

*Die Richtlinie erlaubt dem Anwender die **prinzipielle Prüfung** der in Programmen für die thermische und energetische Gebäudesimulation eingesetzten **Rechenverfahren** durch Berechnung der Testbeispiele mit dem in Betracht kommenden Simulationsprogramm und Vergleich mit den in der Richtlinie dargestellten Ergebnissen. Die Richtlinie gibt Hinweise auf Verfahren, mit denen weitere Beispiele verifiziert werden können.*

15.17 Regeln zur Datenaufnahme

Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Wohngebäudebestand vom 7. April 2015 [32].

2 Vereinfachungen beim geometrischen **Aufmaß**

3 Vereinfachte Ermittlung der energetischen Qualität bestehender **Bauteile**

4 Vereinfachte Ermittlung der energetischen Qualität der **Anlagentechnik**

6 Anforderungsniveau der **Wärmeschutzverordnung 1977**

1 6 Anhang: Umsetzung Randbedingungen für die Berechnungen/Simulationen

16.1 Geometrie

16.1.1 Berechnungsmodell Einraummodul

Die Berechnungen erfolgen anhand eines Einzonenmodells, welches einen Raum im Gebäude repräsentiert. Der Geometrie dieses Einraummoduls findet Verwendung als Prüfraum u.a. gemäß DIN EN ISO 13791 [23].

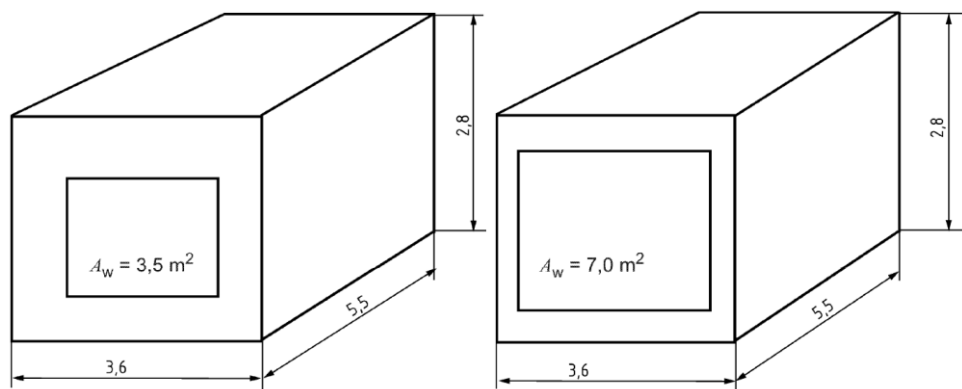


Bild 41: Geometrie des Einraummodells gemäß DIN EN ISO 13791 [23], Geometrie A (links) und Geometrie B (rechts).

Zur Abbildung verschiedener Szenarien im Rahmen der Parametervariationen wurde ein System entwickelt, ausgehend von der Grund-Geometrie den Prüfraum in unterschiedlichen Positionierungen im Gebäude zu modellieren. Die nachfolgende Prinzipskizze gibt dies wieder.

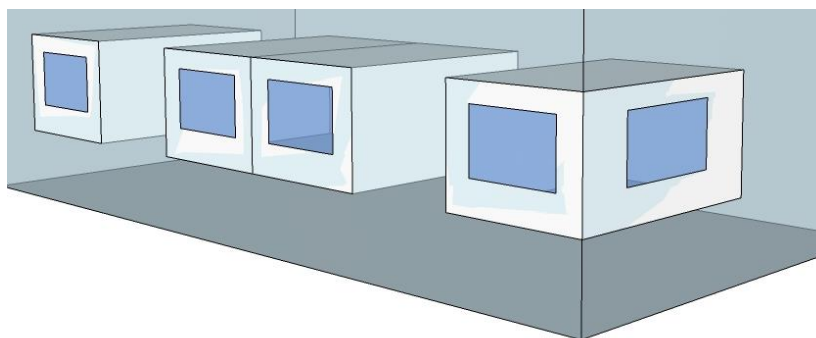


Bild 42: Prinzipskizze der Variation der Positionierung des Einraummoduls im Gebäude. Zentralraum (links), Doppelraum (mittig) und Eckraum (rechts).

Als Grundfall ist dabei der **Zentralraum** anzusehen, bei dem das Einraummodul frei in der Fassade angeordnet ist und eine verglaste Fassadenfläche sowie zu

den Nebenräumen und nach oben und unten adiabate Flächen aufweist. Eine Variante des Zentralraums ist der **Doppelraum**, welcher aus zwei nebeneinander liegenden Einraummodulen besteht, und für die Modellierung größerer Raumgrundflächen herangezogen werden kann (z.B. Klassenzimmer). Durch die Positionierung des Raummoduls als **Eckraum** ergeben sich zwei verglaste Fassadenflächen und damit größere Fensterflächenanteile.

Für alle Positionierungsvarianten erfolgt je nach gewähltem Szenario eine Variation der Orientierung und des Fensterflächenanteils, d.h. der Raum wird in vier Haupt-Himmelsrichtungen gedreht (ggf. auch Zwischenorientierungen, d.h. insgesamt acht) und die Fenstergröße, d.h. der Fensterflächenanteil der Fassadenflächen, von 0 m² (kein Fenster, theoretische Grenzbetrachtung) bis zur Vollverglasung (nur Fenster) variiert.

16.1.2 Geometrische Randbedingungen

Das Berechnungsmodell entspricht einem Einzelraum mit einer Grundfläche von 19 m² und einer lichten Raumhöhe von 2,8 m.

Um zu vermeiden, bei der Modellierung der Geometrien mit unterschiedlichen Außen- und Innenmaßbezügen zu arbeiten, werden Brutto- und Nettovolumen gleichgesetzt, d.h. die Dicke der Bauteile vernachlässigt. Für die Brüstungshöhe wird 0,8 m vorgegeben, sofern der Fensterflächenanteil dies zulässt, bei größeren Fensterflächenanteilen wird diese geschosshoch modelliert, d.h. die Höhe der Brüstung liegt dann bei 0 m.

Tabelle 29: Flächen- und Volumenermittlung der Modellräume.

Modellraum	Maße [m]			Bauteilflächen A [m ²]			Nutzfläche	Volumen
	B	L	h ¹	Fassade 1	Fassade 2	Dach	A _{NGF} [m ²]	V=V _e [m ³]
Zentralraum	3,6	5,5	2,8	10,1	-	-	19,8	55,4
Doppelraum	7,2	5,5	2,8	20,2	-	-	28,6	110,8
Eckraum	5,5	3,6	2,8	15,4	10,1	-	19,8	55,4

¹⁾ Geschosshöhe (Höhe Fassade entspricht Höhe Sturz, d.h. lichter Raumhöhe).

Im Fall des Eckraums bezieht sich die Angabe der Orientierung auf die Hauptfassade (Fassade 1) mit der größeren Fläche, d.h. $B = 5,5 \text{ m}$. Die Ausrichtung der zweiten Fassade ($L = 3,6 \text{ m}$) erfolgt im Uhrzeigersinn.

Für die Berechnung der Tageslichtversorgung und damit der Wärmeeinträge durch künstliche Beleuchtung ist der Anteil des mit Tageslicht versorgten Bereiches an der Nettogrundfläche relevant. Hier bietet DIN V 18599-4 einen Berechnungsansatz, der über die Geometrie des Beleuchtungsbereichs sowie der Ausführung der Fensterflächen eine Abschätzung erlaubt. Besonders im Falle

kleiner Fensterflächenanteile oder großer Raumtiefen ist nicht mehr die gesamte Grundfläche als Tageslichtversorgt anzunehmen, wodurch sich ein größerer Einfluss auf die Wärmeeinträge ergibt. In der Berechnung werden die Typräume über ein polygonales Modell abgebildet, welches erlaubt, diesen Berechnungsansatz vollständig anzuwenden, also z.B. auch bei Eckräumen eine Überlappung der Tageslichtversorgten Flächen zu berücksichtigen.

16.2 Bauteile (Kennwerte, Gebäudeschwere)

16.2.1 Kenndaten opake und transparente Bauteile

Der Wärmeschutz der Gebäudehülle orientiert sich an dem durch die EnEV 2009 bzw. 2016 [1] festgelegten Niveau des Referenzgebäudes für den Neubau. Es ergeben sich die in der folgenden Tabelle zusammengefassten Kenndaten der Bauteile für normal beheizte Gebäude. Die Werte für EnEV 2016 liegen nicht direkt vor und wurden aus den Ergebnissen verschiedener Untersuchungen abgeleitet.

Tabelle 30: Wärmeschutzniveaus (Qualität der Bauteile) für Wohn- und Nichtwohngebäude gemäß EnEV 2009 und EnEV 2016.

	U (α) Außenwand W/(m ² K)	U (g) Vorhang W/(m ² K)	U (α) Tür W/(m ² K)	U (α) Dach W/(m ² K)	U Boden W/(m ² K)	U (g) Fenster W/(m ² K)	U (g) Dachfenster W/(m ² K)	ΔU_{WB} W/(m ² K)	n ₅₀ h ⁻¹	n ₅₀ LA h ⁻¹
EnEV 2009	0,28 (0,5)	1,4 (0,48)	1,8 (0,5)	0,20 (0,8)	0,35	1,3 (0,6)	1,4 (0,6)	0,05	2	1
EnEV 2016	0,24 (0,5)	1,3 (0,48)	1,8 (0,5)	0,20 (0,8)	0,30	0,95 (0,5)	1,4 (0,6)	0,03	2	1

Legende

Außenwand	Außenwand (einschließlich Einbauten, wie Rollladenkästen), Geschossdecke gegen Außenluft
Vorhang	Vorhangfassade
Tür	Außentüren
Dach	Dach, oberste Geschossdecke, Wände zu Abseiten
Boden	Außenwand gegen Erdreich, Bodenplatte, Wände und Decken zu unbeheizten Räumen
Fenster	Fenster, Fenstertüren
Dachfenster	Dachflächenfenster
ΔU_{WB}	Wärmebrücken
LA	bei Lüftungsanlagen (Zu-/Abluft)
ohne	Wohngebäude: Lichtkuppeln, Nichtwohngebäude: τ_{D65} , Glasdächer, Lichtbänder, Lichtkuppeln
Werte für α angenommen (Richtwerte).	

Für den Minderungsfaktor infolge Rahmenanteil wird bei den Fenstern ein Wert von $F_r = k_f = 0,7$ angesetzt, welcher gemäß DIN V 18599-2 auch als Richtwert definiert ist.

Auf eine explizite Definition einer Variante mit Sonnenschutzverglasung wird verzichtet, da diese analog über die Variation des Minderungsfaktors für Sonnenschutz F_c abgebildet werden kann. Ebenfalls nicht als Variante abgebildet sind die abweichenden Kennwerte für eine Vorhangfassade, da der thermische Einfluss des leicht erhöhten U-Wertes sich nur geringfügig auf die Ergebnisse auswirkt und die Variation des Sonnenschutzsystems eine Änderung des g-Wertes einschließt.

16.2.2 Wärmeübergang (U-Wert-Berechnung)

Die Werte für Wärmeübergangswiderstände (R) bzw. -koeffizienten (h) werden gemäß DIN EN ISO 6946 [26] angesetzt.

Da bei den innenliegenden horizontalen Bauteilen keine eindeutige Zuordnung der Richtung des Wärmestroms nach oben bzw. nach unten möglich ist wird für diese Fälle als Näherung der Mittelwert zwischen dem Wärmeübergang für aufwärts und abwärts gerichteten Wärmestrom verwendet. Die resultierenden kombinierten Wärmeübergänge (Konvektion und Wärmestrahlung finden sich in Tabelle 31, die rein konvektiven Wärmeübergänge (notwendig für TRNSYS) finden sich in Tabelle 32. Für die Ermittlung des konvektiven Anteils der Wärmeübergänge wird auf Anhang A der DIN EN ISO 69469 und die dort beschriebenen Näherungen verwiesen, d.h. Gleichungen (A.4) bis (A.6).

Tabelle 31: Wärmeübergangswiderstände und -koeffizienten gemäß DIN EN ISO 6946.

Wärmestromrichtung		aufwärts		horizontal		abwärts		vertikal intern	
		[m²K/W]	[m²K h/kJ]	[m²K/W]	[m²K h/kJ]	[m²K/W]	[m²K h/kJ]	[m²K/W]	[m²K h/kJ]
Widerstand	innen R_{si}	0,1	0,028	0,13	0,036	0,17	0,047	0,135	0,038
	außen R_{se}	0,04	0,011	0,04	0,011	0,04	0,011	0,04	0,011
		[W/(m²K)]	[kJ/(m²K h)]	[W/(m²K)]	[kJ/(m²K h)]	[W/(m²K)]	[kJ/(m²K h)]	[W/(m²K)]	[kJ/(m²K h)]
Koeffizient	innen h_{si}	10	36	7,7	27,7	5,9	21,2	7,941	28,6
	außen h_{se}	25	90	25	90	25	90	25	90

Tabelle 32: Konvektive Wärmeübergangswiderstände und -koeffizienten gemäß DIN EN ISO 6946.

Wärmestromrichtung		aufwärts		horizontal		abwärts		vertikal intern	
		[m ² K/W]	[m ² K h/kJ]	[m ² K/W]	[m ² K h/kJ]	[m ² K/W]	[m ² K h/kJ]	[m ² K/W]	[m ² K h/kJ]
Widerstand	innen R _{si}	0,2	0,056	0,4	0,111	1,429	0,397	0,814	0,226
	außen R _{se}	0,05	0,014	0,05	0,014	0,05	0,014	0,05	0,014
		[W/(m ² K)]	[kJ/(m ² K h)]	[W/(m ² K)]	[kJ/(m ² K h)]	[W/(m ² K)]	[kJ/(m ² K h)]	[W/(m ² K)]	[kJ/(m ² K h)]
Koeffizient	innen h _{si}	5	18	2,5	9	0,7	2,52	2,85	10,26
	außen h _{se}	20	72	20	72	20	72	20	72

16.2.3 Gebäudeschwere, wirksame Wärmespeicherfähigkeit

Allgemein gibt DIN V 18599-2 vor, die wirksame Wärmespeicherfähigkeit gemäß DIN EN ISO 13786 [25] zu bestimmen, wobei "in der Regel" das vereinfachte Verfahren nach Anhang A dieser Norm (10-cm-Regel) ausreichend ist. Das ausführliche Verfahren ist für Bauteile mit thermisch abgedeckten Speichermassen zu verwenden, also z.B. bei aufgeständerten Fußböden oder abgehängten Decken).

Für die wirksame Wärmespeicherfähigkeit sind gemäß DIN V 18599-2 [5] verschiedene vereinfachte Richtwerte angegeben, d.h. der auf die Bezugs- oder Nettogrundfläche bezogene Pauschalwert c_{wirk} beträgt

- 50 Wh/(m²K) für leichte Gebäudezonen,
- 90 Wh/(m²K) für mittelschwere Gebäudezonen und
- 130 Wh/(m²K) für schwere Gebäudezonen.

Als Standardwert gilt der Wert für leichte Gebäudezonen. Für die Einstufung der Bauschwere "mittelschwer" und "schwer" sind folgende Eigenschaften angegeben:

- massive Innen- und Außenbauteile, Dichte $\geq 600 \text{ kg/m}^3$ (mittelschwer) bzw. 1.000 kg/m^3 (schwer),
- keine abgehängten oder thermisch abgedeckten Decken,
- keine innenliegende Wärmedämmung an den Außenbauteilen sowie
- keine hohen Räume (z.B. Turnhallen, Museen usw.).

Die im Variationsrechnungen im Rahmen der vorliegenden Untersuchung beziehen sich auf die Varianten in leichter und schwerer Bauweise, wodurch die Bandbreite der Variation abgedeckt ist.

16.2.4 Bauteilaufbauten

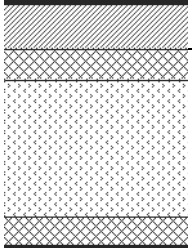
Während es für die Berechnungen nach DIN V 18599 und DIN 4108-2 ausreichend ist, für die Bauteile berechnet U-Werte anzusetzen sowie eine pauschale Größe für die Gebäudeschwere, ist für die dynamische Simulation erforderlich, einen Bauteilaufbau explizit in Form einer Schichtgenfolge anzugeben. Für die vorliegenden Untersuchungen werden dabei Bauteilaufbauten verwendet, welche gemäß DIN EN ISO 13791 [23] für Validierungsrechnungen definiert wurden.

Diese Bauteilaufbauten werden für die Variationsrechnungen dahingehend modifiziert, dass sie je nach gewählter Variante bezüglich Wärmeschutzniveau (U-Wert) und Gebäudeschwere äquivalente Eigenschaften aufweisen. Siehe nächsten Abschnitt.

Bei leichter Bauart wird für Decke und Fußboden ein Aufbau verwendet, welcher durch eine abgehängte Akustikplatte und zwei Dämmschichten eine thermische Trennung der Betonschicht vom Raum aufweist. Dabei wurde gegenüber den Vorgaben der Norm die Dicke der zweiten Dämmschicht (Bodenplatte Lfd. Nr. 5) angepasst, um auch schlechtere U-Werte abbilden zu können (jetzt 4 cm, vorher 10 cm).

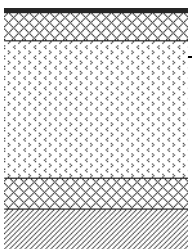
Bei den Bauteilaufbauten ist die raumseitige Schicht (innen) mit der laufenden Nummer 1 beziffert, analog zu den Vorgaben des Simulationsprogramms TRN-SYS. Bei den graphischen Darstellungen der Schichtenfolge ist die raumseitige Schicht jeweils oben bzw. links angeordnet.

Tabelle 33: Bauteilaufbau Fußboden - Bauart leicht (L).

Boden - L	Lfd. Nr.	Schicht	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m K)]	Dichte ρ [kg/m ³]	Wärmespeicherfähigkeit c_p [kJ/(kg K)]
	1	Kunststoffbelag	0,004	0,23	1500	1,5
	2	Zementestrich	0,06	1,4	2000	0,85
	3	Dämmschicht	0,04	0,04	50	0,85
	4	Beton	0,18	2,1	2400	0,85
	5	Dämmschicht	0,04 ¹	0,04	50	0,85
	6	Akustikplatte	0,02	0,06	400	0,84

¹⁾ Schichtdicke gegenüber DIN EN ISO 13791 angepasst.

Tabelle 34: Bauteilaufbau Decke - Bauart leicht (L).

Decke - L	Lfd. Nr.	Schicht	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m K)]	Dichte ρ [kg/m ³]	Wärmespeicherfähigkeit c_p [kJ/(kg K)]
	1	Akustikplatte	0,02	0,06	400	0,84
	2	Dämmschicht	0,04 ¹	0,04	50	0,85
	3	Beton	0,18	2,1	2400	0,85
	4	Dämmschicht	0,04	0,04	50	0,85
	5	Zementestrich	0,06	1,4	2000	0,85
	6	Kunststoffbelag	0,004	0,23	1500	1,5

¹⁾ Schichtdicke gegenüber DIN EN ISO 13791 angepasst.

Für mittlere und schwere Bauweise findet bei Fußboden und Decke ein abweichender Aufbau ohne abgehängte Akustikdecke Verwendung, wodurch bei der Decke die Betonschicht und beim Boden der Estrich für die Zeitkonstante des Raums und damit die Bauschwere relevant sind.

Tabelle 35: Bauteilaufbau Fußboden - Bauart mittel und schwer (M, S).

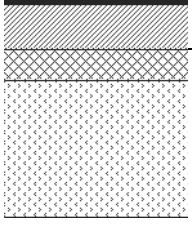
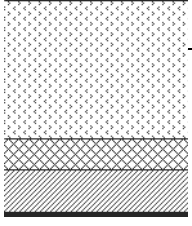
Boden - M, S		Lfd. Nr.	Schicht	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m K)]	Dichte ρ [kg/m ³]	Wärmespeicherfähigkeit c_p [kJ/(kg K)]
		1	Kunststoffbelag	0,004	0,23	1500	1,5
		2	Zementestrich	0,06	1,4	2000	0,85
		3	Dämmschicht	0,04	0,04	50	0,85
		4	Beton	0,18	2,1	2400	0,85
		5					
		6					

Tabelle 36: Bauteilaufbau Decke - Bauart mittel und schwer (M, S).

Decke - M, S		Lfd. Nr.	Schicht	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m K)]	Dichte ρ [kg/m ³]	Wärmespeicherfähigkeit c_p [kJ/(kg K)]
		1	Beton	0,18	2,1	2400	0,85
		2	Dämmschicht	0,04	0,04	50	0,85
		3	Zementestrich	0,06	1,4	2000	0,85
		4	Kunststoffbelag	0,004	0,23	1500	1,5
		5					
		6					

Für die Außenwand wird bei allen Bauweisen der gleiche Aufbau verwendet, d.h. eine massive Mauerwerks-Wand (z.B. Kalksandstein) mit Dämmschicht, welche abweichend von DIN EN ISO 13791 als Innendämmung ausgeführt ist, um die Variantenbildung für verschiedene Gebäudeschweren durch thermische Entkopplung (durch die Dämmschicht) zu erleichtern.

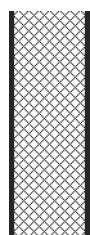
Tabelle 37: Bauteilaufbau Außenwand - Bauart leicht, mittel und schwer (L, M, S).

Außenwand - L, M, S	Lfd. Nr.	Schicht	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m K)]	Dichte ρ [kg/m ³]	Wärmespeicherfähigkeit c_p [kJ/(kg K)]
	1	Innenputz	0,015	0,7	1400	0,85
	2	Dämmschicht	0,06	0,04	30	0,85
	3	Mauerwerk	0,175	0,79	1600	0,85
	4	Außenschicht	0,115	0,99	1800	0,85
	5					
	6					

Für die (adiabaten) Innenwände wird eine Leichtbaukonstruktion verwendet. Für die schwere Bauweise werden diese jedoch als Mauerwerkswand (etwas leichter als bei der Außenwand) ausgeführt, um den Raum mit ausreichender Masse zu versehen (Dämmung außen).

Tabelle 38: Bauteilaufbau Innenwand - Bauart leicht und mittel (L, M).

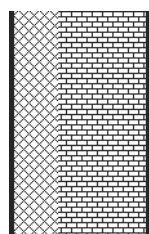
Innenwand - L, M



Lfd. Nr.	Schicht	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m K)]	Dichte ρ [kg/m ³]	Wärmespeicherfähigkeit c_p [kJ/(kg K)]
1	Gipsputz	0,012	0,21	900	0,85
2	Dämmschicht	0,1	0,04	30	0,85
3	Gipsputz	0,012	0,21	900	0,85
4					
5					
6					

Tabelle 39: Bauteilaufbau Innenwand - Bauart schwer (S).

Innenwand - S



Lfd. Nr.	Schicht	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m K)]	Dichte ρ [kg/m ³]	Wärmespeicherfähigkeit c_p [kJ/(kg K)]
1	Gipsputz	0,012	0,21	900	0,85
2	Mauerwerk	0,115	0,5	1000	0,85
3	Dämmschicht	0,06	0,04	30	0,85
4	Gipsputz	0,012	0,21	900	0,85
5					
6					

16.2.5 Anpassung der Bauteilaufbauten bezüglich U-Wert und Zeitkonstante

Die Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) erfolgt gemäß dem Verfahren der DIN EN ISO 6946 [26], auch die Werte für die Wärmeübergangswiderstände sind dieser Norm entnommen.

Für die Berechnung der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit (Gebäudezeitkonstante, Gebäudeschwere) wird das vereinfachte Verfahren gemäß DIN EN ISO 13786 [25] Anhang A verwendet (Verfahren der wirksamen Dicke). Die effektive Höchstdicke wird im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen mit 100 mm angenommen, bei einer Periodendauer der Schwankungen von einem Tag.

Die dargestellten Bauteilaufbauten werden für die Variationsrechnungen dahingehend modifiziert, dass sie je nach gewählter Variante bezüglich Wärmeschutzniveau (U-Wert) und Gebäudeschwere äquivalente Eigenschaften aufweisen. Dabei wird die folgende zweistufige Methodik verwendet, d.h.

- a) Die Anpassung der Bauteilaufbauten an unterschiedliche Wärmeschutzniveaus erfolgt über die Änderung der Dicke der Dämmschicht, bei Vorhandensein von zwei Dämmschichten die jeweils innere. Die jeweils zu erreichenden U-Werte sind in Tabelle 30 definiert.
- b) Die Annäherung der Gebäudeschwere (der betrachteten Zone bzw. des Raummoduls) an den jeweiligen Richtwert für die wirksame Wärmespeicherefähigkeit erfolgt über die Änderung der Dicke der Estrichschicht des Bodens.

Die Bestimmung der Schichtdicken erfolgt iterativ in zwei Berechnungsdurchgängen. In den folgenden Tabellen sind die modifizierten Schichtdicken zusammengestellt.

Hinweis: die Anpassung der Gebäudeschwere über die Änderung der Schichtdicke des Estrichs ist im vorliegenden Simulationsmodell zulässig, da die Strahlung im einfachen Modus (TRNSYS) abgebildet wird (kein Raytracing).

Tabelle 40: Zusammenstellung der modifizierten Schichtdicken (Dämmung, Schicht Nr. 3 (Boden) bzw. 2 (restliche Bauteile) zur Annäherung an die U-Werte verschiedener Wärmeschutzniveaus.

Bauteil	Schichtdicke d [m]						Abweichung Ziel (U-Wert)						
	Bauart	L	L	M	M	S	S	L	L	M	M	S	S
	Niveau	EnEV 2009	EnEV 2016	EnEV 2009	EnEV 2016	EnEV 2009	EnEV 2016	EnEV 2009	EnEV 2016	EnEV 2009	EnEV 2016	EnEV 2009	EnEV 2016
Boden		0,04	0,06	0,1	0,11	0,09	0,11	1%	0%	-4%	3%	-4%	3%
Decke		0,05	0,07	0,1	0,12	0,1	0,12	-2%	-3%	0%	0%	0%	0%
Außenwand		0,12	0,15	0,12	0,15	0,12	0,15	1%	-3%	1%	-3%	1%	-3%
Innenwand		0,1	0,12	0,1	0,12	0,09	0,11	-1%	-1%	-1%	-1%	0%	-1%

Legende: L - leichte Bauweise ($c_{\text{wirk}} = 50 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$), M - mittelschwere Bauweise ($c_{\text{wirk}} = 90 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$), S - schwere Bauweise ($c_{\text{wirk}} = 130 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$)

Tabelle 41: Zusammenstellung der modifizierten Schichtdicken (Estrich im Fußboden) zur Annäherung an die Richtwerte der Wärmespeicherfähigkeit c_{wirk} verschiedener Bauweisen - Raumgeometrie: Zentralraum.

Fensterflächenanteil [-]	Schichtdicke d [m]						Abweichung Ziel (c _{wirk})						
	Bauart	L	L	M	M	S	S	L	L	M	M	S	S
	Niveau	EnEV 2009	EnEV 2016	EnEV 2009	EnEV 2016	EnEV 2009	EnEV 2016	EnEV 2009	EnEV 2016	EnEV 2009	EnEV 2016	EnEV 2009	EnEV 2016
0,3		0,09	0,09	0,05	0,05	0,04	0,04	4%	4%	0%	0%	-2%	-2%
0,5		0,09	0,09	0,05	0,05	0,05	0,05	3%	3%	-1%	-1%	2%	2%
0,7		0,09	0,09	0,05	0,05	0,05	0,05	2%	2%	-1%	-1%	1%	1%
1		0,09	0,09	0,05	0,05	0,05	0,05	1%	1%	-2%	-2%	1%	1%

Legende: L - leichte Bauweise ($c_{\text{wirk}} = 50 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$), M - mittelschwere Bauweise ($c_{\text{wirk}} = 90 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$), S - schwere Bauweise ($c_{\text{wirk}} = 130 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$)

Tabelle 42: Zusammenstellung der modifizierten Schichtdicken (Estrich im Fußboden) zur Annäherung an die Richtwerte der Wärmespeicherfähigkeit c_{wirk} verschiedener Bauweisen - Raumgeometrie: Doppelraum.

Fensterflächenanteil [-]	Schichtdicke d [m]						Abweichung Ziel (c _{wirk})						
	Bauart	L	L	M	M	S	S	L	L	M	M	S	S
	Niveau	EnEV 2009	EnEV 2016	EnEV 2009	EnEV 2016	EnEV 2009	EnEV 2016	EnEV 2009	EnEV 2016	EnEV 2009	EnEV 2016	EnEV 2009	EnEV 2016
0,3		0,09	0,09	0,05	0,05	0,08	0,08	0%	0%	-2%	-2%	-1%	-1%
0,5		0,09	0,09	0,06	0,06	0,08	0,08	-1%	-1%	2%	2%	-1%	-1%
0,7		0,09	0,09	0,06	0,06	0,08	0,08	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%
1		0,1	0,1	0,06	0,06	0,09	0,09	2%	2%	1%	1%	1%	1%

Legende: L - leichte Bauweise ($c_{\text{wirk}} = 50 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$), M - mittelschwere Bauweise ($c_{\text{wirk}} = 90 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$), S - schwere Bauweise ($c_{\text{wirk}} = 130 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$)

Tabelle 43: Zusammenstellung der modifizierten Schichtdicken (Estrich im Fußboden) zur Annäherung an die Richtwerte der Wärmespeicherfähigkeit c_{wirk} verschiedener Bauweisen - Raumgeometrie: Eckraum.

Fensterflächenanteil [-]	Schichtdicke d [m]						Abweichung Ziel (c_{wirk})						
	Bauart	L	L	M	M	S	S	L	L	M	M	S	S
	Niveau	EnEV 2009	EnEV 2016	EnEV 2009	EnEV 2016	EnEV 2009	EnEV 2016	EnEV 2009	EnEV 2016	EnEV 2009	EnEV 2016	EnEV 2009	EnEV 2016
0,3		0,08	0,08	0,05	0,05	0,08	0,08	-4%	-4%	1%	1%	1%	1%
0,5		0,09	0,09	0,05	0,05	0,08	0,08	3%	3%	-1%	-1%	0%	0%
0,7		0,08	0,08	0,05	0,05	0,08	0,08	0%	0%	-2%	-2%	-1%	-1%
1		0,1	0,1	0,06	0,06	0,09	0,09	2%	2%	1%	1%	1%	1%

Legende: L - leichte Bauweise ($c_{\text{wirk}} = 50 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$), M - mittelschwere Bauweise ($c_{\text{wirk}} = 90 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$), S - schwere Bauweise ($c_{\text{wirk}} = 130 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$)

16.2.6 Sonnenschutz

Im Berechnungsverfahren gemäß DIN V 18599 erfolgt die Berücksichtigung des Sonnenschutzes anhand des Gesamtenergiedurchlassgrads g_{tot} für das Fenster einschließlich Sonnenschutzvorrichtung, wobei auch die Aktivierung beweglicher Systeme in die Berechnung eingeht. Kennwerte für übliche Systemkombinationen sind in DIN V 18599-2 angegeben.

Im Berechnungsverfahren gemäß DIN V 18599-2 können die folgenden unterschiedlichen Ausführungen von Sonnenschutzvorrichtungen rechnerisch bewertet werden:

- kein Blend- oder Sonnenschutz
- feststehender Sonnenschutz (inkl. Blendschutz)
- variabler (beweglicher) Sonnenschutz, manuell- oder zeitgesteuert
- variabler (beweglicher) Sonnenschutz, automatisch gesteuert (strahlungsabhängig geregelt)

Gemäß der älteren Fassungen der DIN V 18599 sind für Wohnnutzungen nur feststehende Sonnenschutzvorrichtungen vorgesehen, mit der Neuausgabe wurde diese Beschränkung aufgehoben.

Im Fall der Bilanzierung der Beleuchtung wird das Beleuchtungsmodell mit korrespondierenden Parametern versehen, da das Sonnenschutz-System auch die Blendschutz-Funktion übernimmt, d.h. es werden nur Blendschutz- bzw. automatisch betriebene Sonnen-/Blendschutzsysteme berücksichtigt.

16.3 Nutzungsbedingte Randbedingungen

Die Randbedingungen und Parameter, welche sich aus der Art der Nutzung des Gebäudes bzw. der Gebäudezone ergeben, sind in DIN V 18599 in Nutzungsprofilen zusammengefasst (Teil 10 der Norm). Neben verschiedenen Profilen für Nichtwohnnutzung ist die Wohnnutzung für Einfamilienhäuser (EFH) und Mehrfamilienhäuser (MFH) definiert. Die vorliegenden Variationsrechnungen beschränken sich auf die Wohnnutzung sowie ausgewählte Profile der Nichtwohnnutzung. Die wesentlichen Randbedingungen sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Bei Nichtwohngebäuden sind gemäß DIN V 18599 in den tabellierten Werten für die internen Wärmequellen die Wärmequellen für künstliche Beleuchtung nicht enthalten, da diese - gemäß Teil 4 der Norm - rechnerisch bestimmt werden. Bei den vorliegenden Untersuchungen wird die Beleuchtung nicht separat betrachtet/modelliert/berechnet sondern es wird ein pauschaler Ansatz gewählt.

Im Rahmen der Novellierung des Verfahrens zum sommerlichen Wärmeschutz wurde für die Wärmeeinträge durch Beleuchtung ein praxisüblicher Wert von $12 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \text{ d})$ genannt, welcher für die vorliegenden Berechnungen pauschal angesetzt wird. [12]

Tabelle 44: Randbedingungen (Auswahl) der für die Variationsrechnungen herangezogenen Nutzungsprofile. Quelle DIN V 18599-10 Ausgabe 2016-10.

Nutzungsart ¹	Nutzungs- stunden $t_{\text{nutz,d}}$ [h/d]	Nutzungs- tage $d_{\text{nutz,a}}$ [d/a]	Voll- nutzungs- stunden ² [h/d]	Wärme- quellen ^{3,6} $q_{i,p} + q_{i,fac} + q_{i,l}$ [Wh/(m²d)]	Mindest- außenluft- volumenstrom ⁴ V'_A [m³/(h m²)]	Mindest- außenluft- wechsel ⁵ n_{nutz} [h⁻¹]
Wohnnutzung						
EFH	24	365	17	50	-	0,5
MFH	24	365	17	100	-	0,5
Nichtwohnnutzung ¹						
Gruppenbüro (2)	11	250	6	85	4	1,43
Sitzung (4)	11	250	4	113	15	5,436
Klassenzimmer (8)	7	200	5	132	10	3,657
Serverraum (21)	24	365	12	1.826	1,3	0,546

¹⁾ In Klammern laufende Nummer des Nutzungsprofils gemäß DIN V 18599-10.

²⁾ Vollnutzungsstunden Personen und Geräte (für Serverraum: nur Geräte) für die Umrechnung der internen Wärmequellen [Wh/(m²d)] in [W/m²]. Für Wohnnutzung wird die tägliche Betriebsdauer Heizung angesetzt.

³⁾ Summe Wärmeeinträge durch Personen und Geräte bezogen auf Nutzfläche.

⁴⁾ Mindestaußenluftvolumenstrom Nichtwohnnutzung bezogen auf Nutzfläche.

⁵⁾ Mindestaußenluftwechsel Wohnnutzung (nicht bedarfsgeführt),
Nichtwohnnutzung: aus Mindestaußenluftvolumenstrom und Geometrie des Modellraums berechnet.
Hinweis: die Infiltration wird bei dichter Gebäudehülle ohne Lüftungsanlage mit $n_{\text{inf}} = 0,14 \text{ h}^{-1}$ angesetzt.

⁶⁾ Bei Nichtwohnnutzungen wird für den Anteil der Wärmeeinträge infolge Beleuchtung ein praxisüblicher Wert von pauschal 12 Wh/(m²d) angesetzt.

Eine vollständige Liste der Randbedingungen gemäß DIN V 18599-10 für die relevanten Nutzungsarten ist im Anhang enthalten (Tabelle 28).

Während Wohnnutzung und Serverräume eine ganzjährige und ganztägig Nutzung aufweisen, werden z.B. Büros nur werktags und tagsüber genutzt. Die internen Wärmeeinträge durch Personen und Geräte zeigen bei der Serverräumen erwartungsgemäß ihr Maximum, wogegen der Mindestaußenluftwechsel bei Sitzungszimmern am höchsten ist.

Die als Tageswerte angegebenen Wärmeeinträge sind für die Berechnungen als konstante Wärmeeinträge während der angegebenen Nutzungszeiten anzusetzen. Die Wärmeeinträge werden zu 100 % als konvektive Wärmeeinträge be-

handelt. Für die Zeiten des reduzierten Betriebs an Wochenenden und Ferien sind keine Wärmequellen aus Personen und Arbeitshilfen zu berücksichtigen.

Für die Zeiten des reduzierten Betriebs an Wochenenden und Ferien ist kein Mindestaußenluftvolumenstrom zu berücksichtigen. In Anlehnung an DIN 4108-2 wird außerhalb der Nutzungszeit ein Grundluftwechsel von $n = 0,24 \text{ h}^{-1}$ angesetzt (sofern keine Fälle erhöhter Nachtlüftung betrachtet werden).

16.4 Raumtemperaturen - DIN V 18599-2

Hinsichtlich der jeweils zu berücksichtigenden Raumtemperaturen ist in DIN V 18599-2 zu unterscheiden, ob die Temperatur in die Wärmebilanzierung einfließt, oder ob sie zur Bestimmung der maximalen Kühl- bzw. Heizleistungen herangezogen wird. Nachstehend sind anzusetzende Raumtemperaturen je nach Anwendungsfall erläutert. [33]

16.4.1 Raumtemperatur in der bilanzierten Zone - Heizfall

In der zu bilanzierenden Zone ist ausgehend von einer Raum-Solltemperatur $\theta_{i,h,soll}$ (aus DIN V 18599-10) die Bilanz-Innentemperatur für den Heizfall $\theta_{i,h}$ unter Berücksichtigung von räumlich und/oder zeitlich eingeschränktem Heizbetrieb zu bestimmen. Bei zeitlich eingeschränktem Heizbetrieb (Nachtabsenkung, bzw. -abschaltung) resultieren monatlich unterschiedliche Bilanz-Innentemperaturen. Ein räumlich eingeschränkter Heizbetrieb ist mit den Rechenansätzen in DIN V 18599-2 nur für Wohngebäude vorgesehen. Für Nichtwohngebäude ist eine räumliche Teilbeheizung über eine entsprechende Zonierung zu erfassen.

16.4.2 Raumtemperatur in der bilanzierten Zone - Kühlfall

Die Raumtemperatur nimmt im Kühlfall typischerweise - in Abhängigkeit von der Außentemperatur - unterschiedliche Werte an (Regelungsverhalten des Kühlsystems). Vereinfacht wird in DIN V 18599-10 als Richtwert für die meisten Nutzungen eine durchschnittliche Raum-Solltemperatur von $\theta_{i,c,soll} = 24 \text{ °C}$ angesetzt. Da die Bestimmung des Kühlbedarfs auf einem Ausnutzungsgrad der Wärmequellen für den Heizfall basiert und hierbei eine zulässige Schwankung der Raumtemperatur um 2 K vorausgesetzt wird, ist die Bilanz-Innentemperatur für den Kühlfall um 2 K gegenüber der Raum-Solltemperatur zu reduzieren. Als Bilanz-Innentemperatur für den Kühlfall wird also (im Falle der der o.g. Raum-Solltemperatur) von einem Wert von $\theta_{i,c} = 22 \text{ °C}$ ausgegangen.

Die geschilderten Zusammenhänge werden aus den Darstellungen in Bild 43 deutlich. Im oberen Teil des Bildes (A) sind der Verlauf der Raumtemperatur sowie der Verlauf der Heiz- bzw. Kühllast für einen Beispieltag (14. Mai) als Tagesgang aufgetragen [13]. Die Raumtemperatur wird in diesem Beispiel konstant mit 22 °C gefahren. Es ist kein Schwankungsbereich für die Raumlufttemperatur zugelassen. In der Nacht bis zum Mittag hin resultiert für das Beispiel eine Heizlast, dann tritt auf aufgrund der äußeren Wärmeeinträge in der

Zeit von ca. 12:00 Uhr bis 21:00 Uhr eine Kühllast auf. In dem unteren Teil des Bildes (B) ist die Raumtemperatur mit einer nach oben um 2 K zugelassenen Überschreitung angegeben. Der 2 K Schwankungsbereich ist u.a. in [22] für die Bestimmung des Ausnutzungsgrades zu Grunde gelegt. Wärmequellen werden also bis zu einer Temperaturerhöhung von bis zu 2 K über dem Sollwert als nutzbar betrachtet; es erfolgt somit eine Speicherung von Wärmeeinträgen in der Gebäudekonstruktion. Die über den um 2 K erhöhten Sollwert hinausgehenden Wärmeeinträge müssen durch Kühlung abgeführt werden und stellen in dem Verfahren nach DIN 18599-2 ein Maß für den Kühlbedarf dar. Die allgemeine Formulierung für die Höhe der Raum-Solltemperatur für den Kühlfall lautet somit, dass diese 2 K über der Bilanz-Innentemperatur für den "Heizfall" liegt.

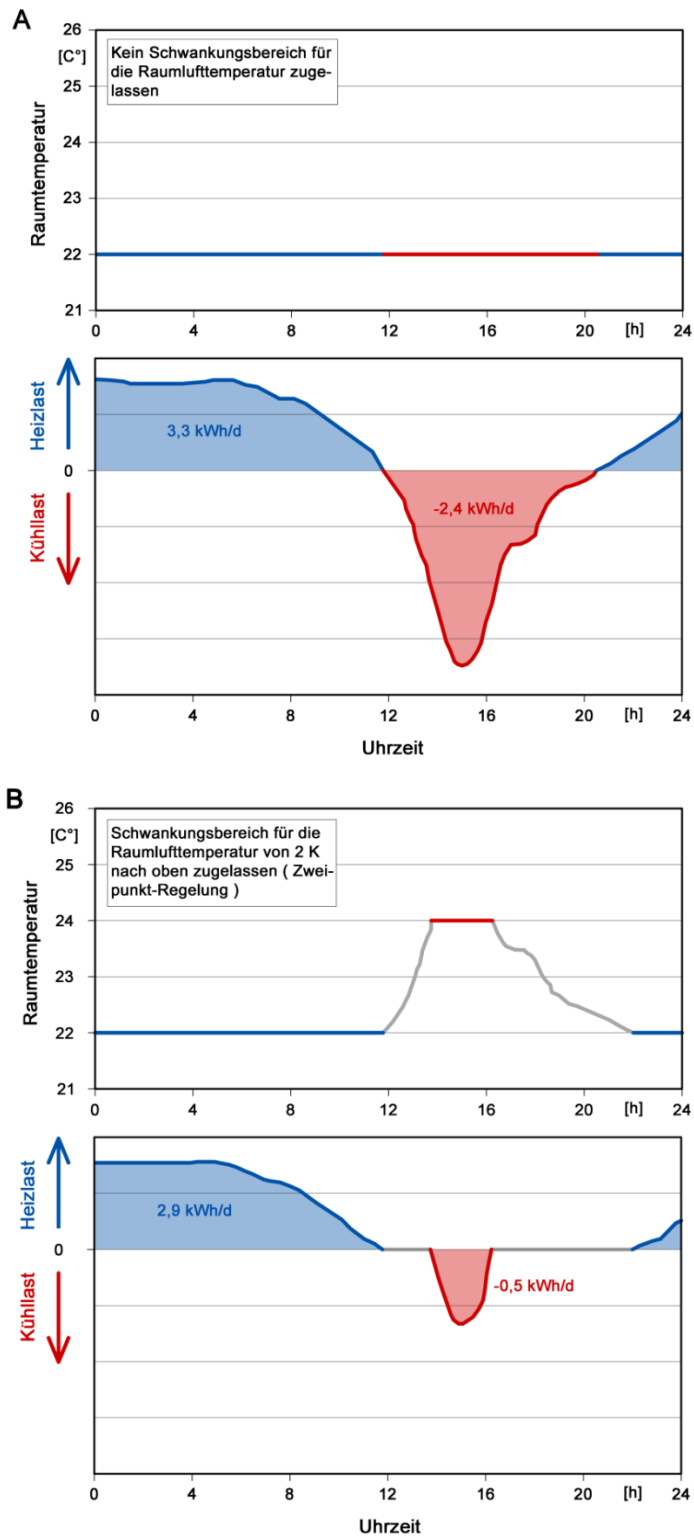


Bild 43: Auswirkungen der zugelassenen Schwankung der Raumtemperatur auf Heiz- und Kühllasten an einem Beispieltag (14. Mai) [13].

16.5 Klimadaten

Die Klimadaten liegen je nach Berechnungsverfahren in unterschiedlichem Umfang vor, d.h.

- für das Monatsbilanzverfahren der DIN V 18599 werden monatsweise unterschiedliche Werte (Monatsmittelwerte) für Solarstrahlung und Außentemperatur verwendet
- für die Simulationsrechnungen werden Testreferenzjahre (TRY) verwendet, bei denen alle Klimadaten in Stundenritten vorliegen - unabhängig vom tatsächlich gewählten Zeitschritt, der auch kleiner sein kann, z.B. 10 min.

Für die Berechnungen/Simulationen zum sommerlichen Wärmeschutz ist die Verwendung der Klimadaten in DIN 4108-2 klar geregelt: für die drei Klimaregionen A, B und C sind die Testreferenzjahre (Normaljahr) der Zonen 2 (Rostock), 4 (Potsdam) und 12 (Mannheim) zu verwenden. Für die Berechnungen gemäß DIN V 18599 enthält Teil 10 alle relevanten Klimadaten, diese Monatswerte wurden aus den Testreferenzjahren abgeleitet. Als Referenzort ist Potsdam angegeben.

Die Datensätze der Testreferenzjahre werden vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung zur Verfügung gestellt und können - zusammen mit weiterführenden Informationen - von der Internetseite heruntergeladen werden, siehe folgender Link.

http://www.bbsr.bund.de/EnEVPortal/DE/Regelungen/Testreferenzjahre/Testreferenzjahre/03_ergebnisse.html?nn=436654

Die aktuelle Version 1.2 enthält für alle 15 deutschen Klimaregionen jeweils einen Datensatz für ein Normaljahr sowie ein extrem warmes Sommer-TRY und extrem kaltes Winter-TRY. Darüber hinaus kann mit einem ebenfalls zur Verfügung gestelltem Werkzeug der Stadteffekt und eine Höhenkorrektur berücksichtigt werden.

16.6 Luftwechsel

In der Bilanz nach DIN V 18599-2 werden bei der Bestimmung der Lüftungswärmequellen und -senken für den Luftwechsel Tagesmittelwerte angesetzt. Für die Simulationsrechnungen werden jedoch Tagesgänge benötigt und die Betriebsweise am Wochenende ist zu definieren. Um hier korrelierende Randbedingungen ansetzen zu können, werden aus den Tagesmittelwerten die nachfolgend beschriebenen Entwicklungen des Parameters im Tagesverlauf abgeleitet.

Die nutzungsbedingten Randbedingungen gemäß DIN V 18599-10 geben Werte für den Mindestaußenluftvolumenstrom (in $[m^3/(h \cdot m^2)]$) bei Nichtwohnnutzung sowie den Mindestaußenluftwechsel n_{nutz} bei Wohnnutzung vor. Mittels der geometrischen Gegebenheiten der Modellräume können auch für Nichtwohnnutzungen Mindestaußenluftwechsel bestimmt werden.

In die Bilanz der Lüftungswärmesenken gehen dann die Luftwechsel für Infiltration, Fensterlüftung und ggf. mechanische Lüftung ein.

Die Bestimmungsgleichung für den Infiltrationsluftwechsel gemäß DIN V 18599-2 berücksichtigt die Luftdichtheit des Gebäudes, d.h.

$$n_{inf} = n_{50} \cdot e_{wind} = 2 \, h^{-1} \cdot 0,07 = 0,14 \, h^{-1} \quad (13)$$

Dabei werden in den vorliegenden Untersuchungen keine Außenluftdurchlässe berücksichtigt. Für die vorliegenden Variationsrechnungen wird gemäß DIN V 18599-2 für die Einschätzung der Gebäudedichtheit "Kategorie I" gewählt, wodurch sich als Bemessungswert für den Luftwechsel bei 50 Pa Druckdifferenz

- für Gebäude ohne raumluftechnische Anlagen mit nachgewiesener Dichtheit $n_{50} = 2 \, h^{-1}$ und
- für Gebäude mit raumluftechnischer Anlage (auch Wohnungslüftungsanlage) $n_{50} = 1 \, h^{-1}$

ergibt. Für den Windschutzkoeffizienten gilt der Standardwert $e_{wind} = 0,07$. Damit ergibt sich der zu bilanzierende Luftwechsel für Infiltration zu $n_{inf} = 0,14 \, h^{-1}$ bzw. $n_{inf} = 0,07 \, h^{-1}$.

Zur Modellierung eines Tagesgangs für den in den Simulationsrechnungen anzusetzenden Luftwechsel wird davon ausgegangen, dass bei Nichtwohnnutzung für die Zeiten außerhalb der täglichen Nutzungszeit sowie am Wochenende durchgehend die Summe der Bilanzluftwechsel für Infiltration und Fensterlüftung angesetzt werden, wobei für den Fensterluftwechsel der Mindestwert von $0,1 \, h^{-1}$ angenommen wird. Während der Nutzungszeit (werktags) wird der Mindestaußenluftwechsel n_{Nutz} gemäß der Vorgaben des Nutzungsprofils angesetzt. Bei Wohnnutzung wird ein konstanter Wert für den Tagesgang und am Wochenende angesetzt.

Im nachfolgenden Diagramm ist dieser Tagesgang des Gesamt-Luftwechsels, d.h. Infiltration und Fensterlüftung, für die Nichtwohn- und Wohnnutzung dargestellt. Die Werte gelten für alle definierten Raumgeometrien (Zentral-, Eck- und Doppelraum), da sie sich hinsichtlich des Verhältnisses Nutzfläche/Volumen nicht unterscheiden. Den Werten liegt ein Infiltrationsluftwechsel von $0,14 \, h^{-1}$ zugrunde, dies entspricht dem Fall der Fensterlüftung. Bei Einsatz von mechanischer Lüftung sind die Werte entsprechend anzupassen.

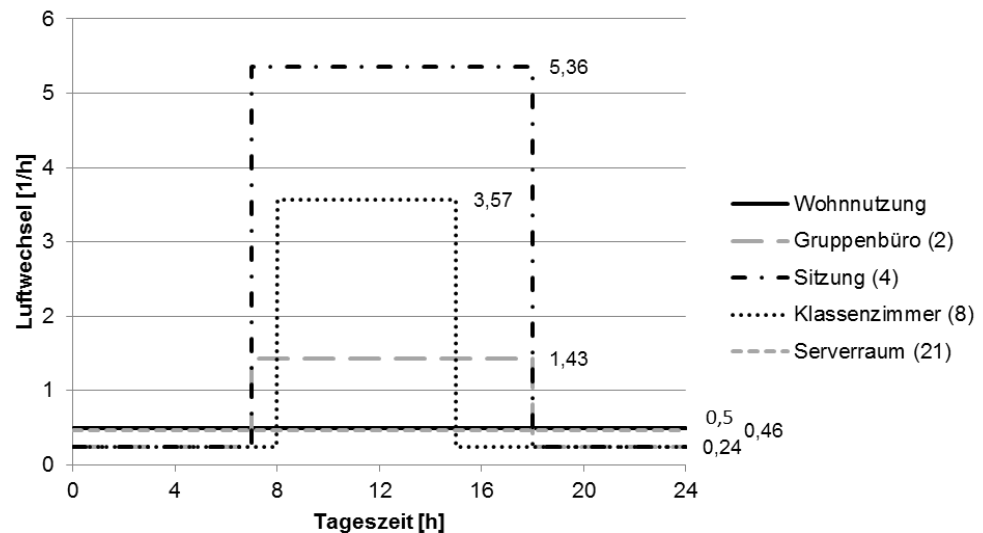


Bild 44: Für die Simulationsrechnungen angesetzter Tagesgang des Gesamt-Luftwechsels während der Nutzungszeit (werktags). Die Werte außerhalb der Nutzungszeit gelten auch für den Wochenendbetrieb, falls vorhanden.

16.7 Zeitabhängige Parameter

Mit der Neuausgabe der DIN 4108-2 [3] liegt eine umfangreiche Sammlung von Randbedingungen vor, die für Simulationsrechnungen herangezogen werden müssen oder können. Siehe Abschnitt 12.2 dieses Dokuments. Bei den zeitabhängigen Parametern betrifft dies insbesondere nutzungsbedingte Festlegungen. Diese Randbedingungen werden generell für alle Berechnungen zugrunde gelegt, für die Untersuchungen im Rahmen der DIN V 18599 sind Anpassungen erforderlich, da über die Büronutzung hinaus auch abweichende Nutzungsprofile Anwendung finden.

Bei den **Nutzungs-** und **Betriebszeiten** werden die Vorgaben der DIN 4108-2 in Verbindung mit den weiteren Regelungen der DIN V 18599-10 verwendet. Für die **Klimadaten** (Regionen oder Referenzstandort) stehen Testreferenzjahre (Simulation) und Monatswerte (DIN V 18599-10) zur Verfügung. Bei der Steuerung der Simulation findet sich in DIN 4108-2 die Vorgabe eines festen **Starttages** (Montag). Für die **internen Wärmeeinträge** gelten ebenfalls die Vorgaben der DIN 4108-2 in Verbindung mit weiteren Nutzungen gemäß DIN V 18599-10. Hierbei zu beachten: "*Die Wärmeeinträge werden zu 100 % als konvektive Wärmeeinträge behandelt.*" (siehe Abschnitt 12.2 Buchstabe e).

Für den Tagesgang des **Luftwechsels** sind über die DIN V 18599 hinaus weitergehende Festlegungen nötig, siehe vorhergehender Abschnitt. Im Rahmen der Berechnungen des Sommerlichen Wärmeschutzes werden neben dem Standardfall des Grundluftwechsel auch weitere optionale Lüftungsstrategien betrachtet, für welche Randbedingungen in DIN 4108-2 festgelegt sind, d.h.

- **erhöhter Tagluftwechsel** bis 3 h^{-1} während der Nutzungszeit bei Raumtemperaturen $> 23 \text{ °C}$ (siehe Abschnitt 12.2 Buchstabe h)
- **erhöhter bzw. hoher Nachtluftwechsel** außerhalb der Nutzungszeit (unter Berücksichtigung weiterer Bedingungen, siehe Abschnitt 12.2 Buchstabe i)
 - bis 2 h^{-1} (erhöht),
 - bis 5 h^{-1} (hoch, geschossübergreifend) oder
 - bei Einsatz einer Lüftungsanlage gemäß Dimensionierung.

Für unterschiedliche Betriebsweisen bei der **Steuerung des Sonnenschutzes** sind in DIN 4108-2 Grenzbeleuchtungsstärken für Wohn- und Nichtwohnnutzung definiert (siehe Abschnitt 12.2 Buchstabe j).

16.8 Randbedingungen operative Temperatur/thermischer Komfort

Für die Bestimmung der operativen Temperatur sind weitere **Festlegungen** zu Randbedingungen **erforderlich**, welche sich an den Vorgaben der DIN EN ISO 7730 [34] orientieren.

Für die Untersuchungen bezüglich **DIN V 18599** dient die operative Temperatur nur als zusätzliche Information, d.h. sie keinen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse, da sie auch nicht als Steuerungsgröße herangezogen wird.

Bei den Simulationen im Rahmen des **sommerlichen Wärmeschutzes** (DIN 4108-4) stellt die operative Temperatur die zentrale Ergebnisgröße dar, da sie für die Bestimmung der Übertemperaturgradstunden verwendet wird, also für die **Anforderungsgröße** wesentlich relevant ist. Allerdings werden in DIN 4108-4 keine Vorgaben zu diesen Randbedingungen gemacht.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen sollten diese Vorgaben möglichst einfach gehalten werden, aber in jedem Fall einheitlich. Daher werden die nachfolgend aufgeführten Randbedingungen für alle Berechnungen herangezogen.

Üblicherweise werden für den colthing factor unterschiedliche Werte für Winter und Sommer verwendet, z.B. 1,0 und 0,5. Aus Gründen der Vereinheitlichung und Vereinfachung (siehe oben) wird für das ganze Jahr ein Wert von 1,0 angesetzt.

Parameter	Zeichen	Einheit	Wert	Anmerkung
Clothing factor	clo	[-]	1,0	
Metabolic rate	met	[-]	1,0	sitzend, entspannt
external work			0	keine
relative air velocity	v_{ar}	[m/s]	0,1	

Bild 45: Randbedingungen operative Temperatur gemäß DIN EN ISO 7730.

1 7 Anhang: Validierung der Simulationsmodelle mittels Messdaten

Im Rahmen dieses vorliegenden Zwischenberichtes ist die Validierung der Systeme Bauplatte und Kühldecke weitgehend abgeschlossen, die Untersuchungen bezüglich der Lüftungstechnik sind aktuell noch in Bearbeitung, die Dokumentation der Ergebnisse erfolgt mit Fertigstellung des Abschlussberichts.

17.1 Validierung Bauplatte

Für die Simulation der Bauplatten wird die Simulationsumgebung esp-r verwendet.

In der Dissertation von Peter Schossig [8] wurden esp-r und ein selbst entwickeltes PCM Modell anhand von Messdaten validiert. Die Messdaten stammen aus dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit unter dem Förderkennzeichen 0239840 A-D geförderten Projekt "Latentwärmespeicher in Baustoffen".

17.1.1 Messaufbau

Zur Vermessung des PCM Baustoffs wurde auf eine Testeinrichtung des Fraunhofer ISE zurückgegriffen, die auf 2 Etagen über insgesamt acht identische Testkabinen verfügt, deren Fassaden austauschbar sind. Die Fassadenseite weist genau nach Süden und ist in den Sommermonaten nahezu über den ganzen Tag unverschattet. Es wurden zwei, mit der gleichen Fassade versehene, identische Leichtbauzellen geschaffen, von denen eine mit einem PCM-Produkt und die andere mit einem bis auf den PCM-Gehalt identischen Referenzprodukt ausgestattet wurde. Auftretende Differenzen im Verhalten der Räume sind ausschließlich dem PCM zuzuordnen und damit quantitativ bewertbar.



Bild 46: Fassadenteststand der Fraunhofer ISE - Blick auf die Südseite. Die beiden Räume links im Bild wurden für die Messungen verwendet.

Die Räume mit einem Außenmaß von 2,54 m x 2,08 m x 2,58 m (T x B x H) werden durch 14 cm starke PU-Sandwichelemente gebildet. Die Testkabinen stehen auf isolierenden Holzelementen im umgebenden Gebäude, so dass Wärmebrücken zwischen Kabine und Gebäude minimiert sind. Das Gebäude wird auf mindestens 20 °C temperiert, jedoch im Sommer nicht gekühlt. Die Fassade verfügt über ein 1,8 m x 0,8 m großes Fenster bestehend aus einer Einfachverglasung außen, einem 5 cm tiefen Luftspalt und einer Doppelverglasung nach innen. Beiden Räume sind mit einer außenliegenden Verschattung ausgerüstet, die den g-Wert der Verglasung (für senkrechten Strahlungseinfall) durch Schließen der Jalousien etwa von 0,75 auf 0,05 reduziert. Zur nächtlichen Entwärmung wurde ein automatisiertes Lüftungssystem in den Zellen installiert.

Die Messwerterfassung erfasste die Wetterdaten: Außenlufttemperatur, relative Feuchte, Windgeschwindigkeit und Einstrahlungen, sowie innerhalb der Räume die Lufttemperatur in unterschiedlichen Höhen, die operative Temperatur, Oberflächentemperaturen und Energieverbräuche für Heizung und Kühlung.

Die inneren Oberflächen wurden zur Aufnahme des PCM Baustoffes mit Gipskartonplatten ausgekleidet.

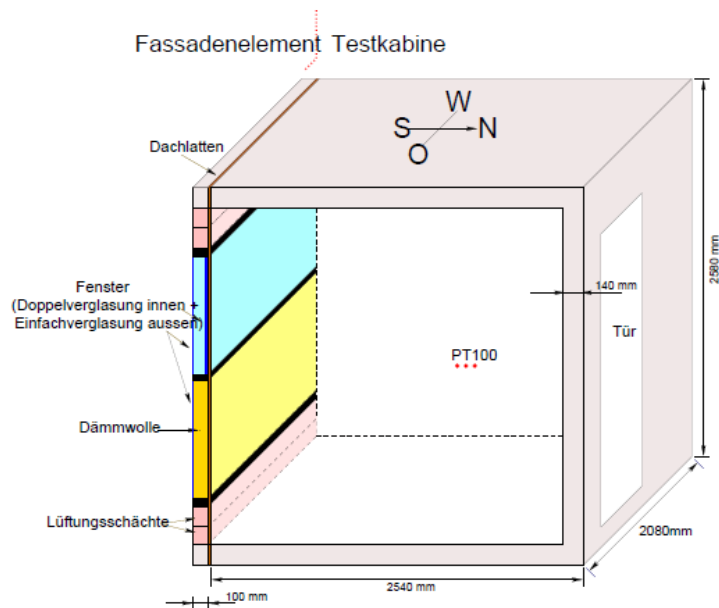


Bild 47: Zeichnung des Testkabinenaufbaus.

PCM Material

Als PCM-Baustoff zur Validierung wurde eine PCM Spachtelmasse verwendet. In weiteren Folgeprojekten wurden auch mit PCM-Gipsputzen und Gipskartonplatten die Simulationsmodelle überprüft.

Die Spachtelmasse wurde auf alle verfügbaren Flächen (Decke und Wände) ca. 6 mm stark aufgetragen und enthielt ca. 40 % PCM-Anteil. Die spezifische Wärmekapazität und Enthalpie der Spachtelmasse im verbauten Zustand wurden mittels DSC-Messungen bestimmt. Der Referenzraum wurde mit der gleichen Menge Spachtelmasse jedoch ohne PCM ausgeführt, um Unterschiede aufgrund der sensiblen Speicherfähigkeit weitestgehend zu reduzieren. Die Menge PCM betrug letztendlich rd. 2,3 kg/m².

In der Spachtelschicht wurden zusätzliche Temperatursensoren und Wärme-flussplatten eingebaut.

17.1.2 Simulationsmodell

Als Simulationsumgebung wurde esp-r der Strathclyde University of Glasgow verwendet. Esp-r verfügt über ein geometrisches Modell der simulierten Räume und eine finite Volumen-Repräsentation der Wände, die eine direkte Manipulation der Materialparameter in den einzelnen Wandschichten zur Laufzeit ermöglicht. Der Aufbau einer mehrschichtigen Wand wird durch ein Netzwerk von Knoten repräsentiert, so dass jedem beliebigen Knoten, und damit jeder Schicht der Wand, zu jedem Rechenzeitschritt eine beispielsweise von der Temperatur abhängige Masse zugewiesen werden kann.

Im ersten Schritt wurde das geometrische Modell einer Testzelle vom Fassaden-teststand in esp-r abgebildet. Für den größten Teil der benötigten Materialdaten wurde auf Herstellerangaben zurückgegriffen. Der U-Wert der gesamten Fassade wurde messtechnisch ermittelt. Für den Wärmeaustausch mit der Umgebung der Testzelle wurden fiktive Räume angenommen, denen die gemessenen Lufttemperaturen in der Halle zugewiesen wurden.

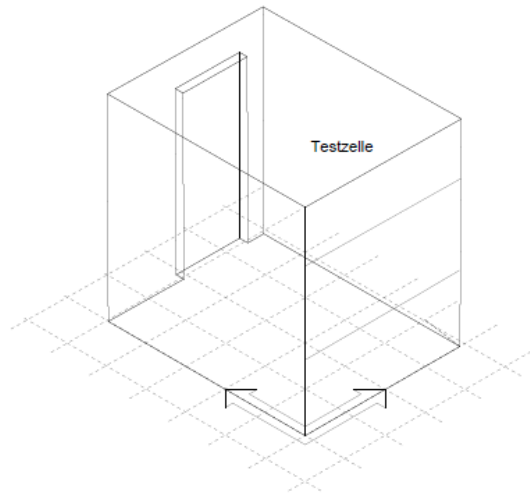


Bild 48: Geometrisches Modell der simulierten Testzelle in esp-r.

17.1.3 Validierung

Im ersten Schritt wurde das Gebäudemodell der Testzelle vor dem Einbringen des Putzes simuliert, um die Güte der Ergebnisse des esp-r Gebäudemodells und der Parametrierung der Testzellen zu überprüfen. Die folgende Grafik zeigt die sehr gute Übereinstimmung des Modells mit den tatsächlich gemessenen Temperaturen.

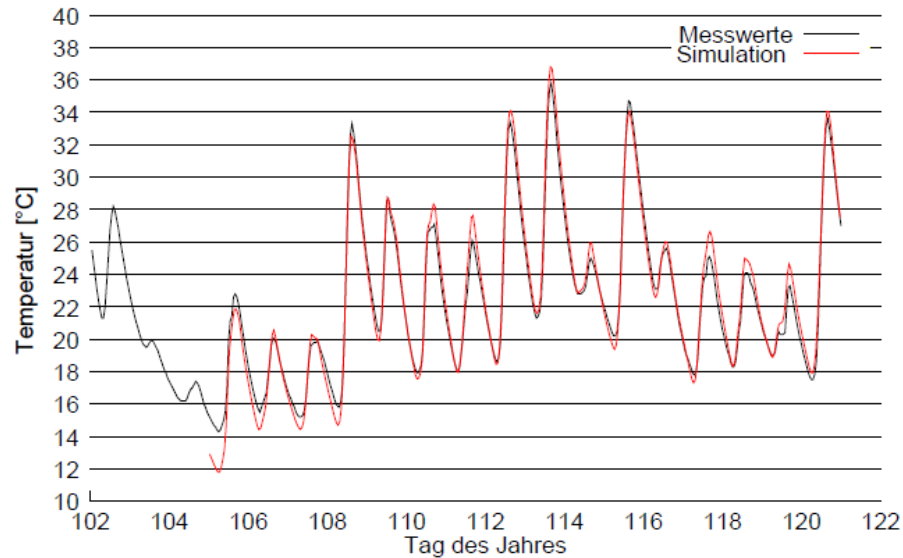


Bild 49: Vergleich der Messwerte einer Testzelle vor Ausrüstung mit den PCM Spachtelmassen mit den simulierten Werten.

Im Anschluss wurden als nächstes Messwerte und simulierte Werte für die mit Referenzputz ausgestattete Zelle simuliert. Auch hier zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der simulierten Werten mit den Messwerten.

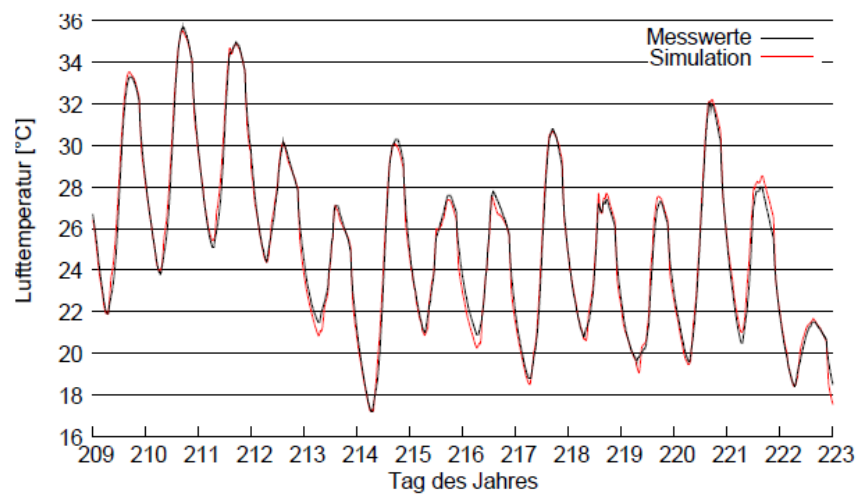


Bild 50: Gemessener und simulierter Verlauf der Raumlufttemperaturen in der Referenzzelle (ohne PCM).

Das Ergebnis der wiederum anschließende Simulation der PCM Testzelle ist in der folgenden Grafik dargestellt. Beim Abkühlen ist die Abweichung etwas größer, als beim Aufheizen, insgesamt ist die Übereinstimmung aber weiterhin gut genug, um mit diesem Modell Aussagen zur Wirksamkeit des jeweiligen PCM-Baustoffs in realen Objekten treffen zu können. Der größere Unterschied beim Abkühlen ist darauf zurückzuführen, dass für das PCM-Modell nur eine Enthalpie-Temperatur-Kurve für das Schmelzen verwendet wird. Unterschiede

im Kristallisationsverlauf (z.B. Unterkühlung und Hysterese) werden daher nicht berücksichtigt, sind für die geplanten Simulation in diesem Forschungsprojekt jedoch auch nicht relevant.

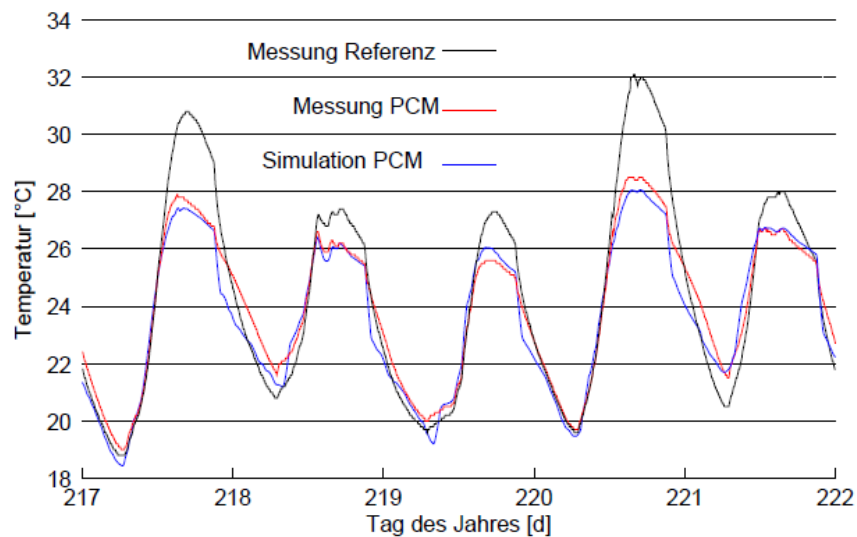


Bild 51: Gemessener und simulierter Verlauf der Raumlufttemperaturen in der PCM Zelle, inkl. Vergleich zur Referenzzelle.

17.2 Validierung Kühldecke

17.2.1 Messaufbau

Der **Raum** in dem die Kühldecken getestet wurden, ist nach DIN EN 442-2 [35] aufgebaut. Im Folgenden werden die Konstruktion des Raumes und der Kühldecke sowie die verwendete Messtechnik näher beschrieben.

Die Außenwände des Testraums bestehen umfänglich aus Aluminiumsandwichplatten mit einer Grundfläche von 4 x 4 m und einer Höhe von 3 m. Die Platten haben eine Dicke von 3 cm und werden durch einen Wasserkreislauf einheitlich temperiert (siehe 1 in Bild 52). Sie sind nach außen mit einer 30 cm und nach innen mit einer 10 cm dicken Isolierung gedämmt. Damit ergibt sich ein Innenmaß von 3,8 x 3,8 x 2,8 m. Die eigentliche Kühldecke mit PCM ist nach DIN EN 14240 [36] in einer Höhe von 2,3 m installiert.

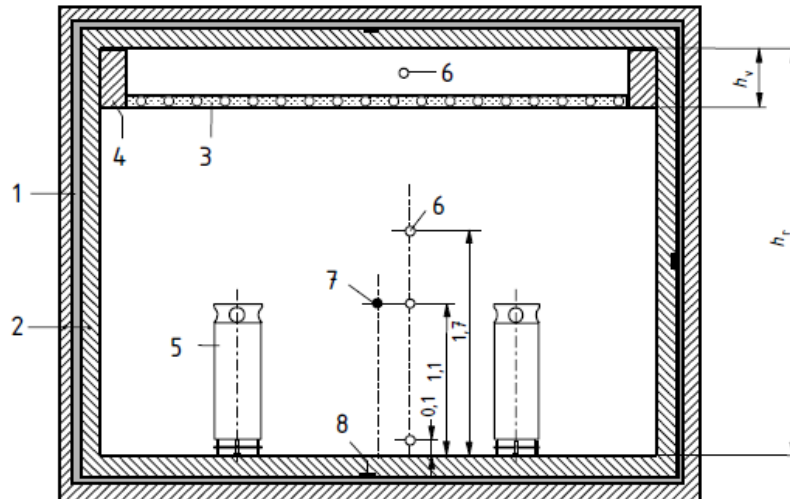


Bild 52: Testraum nach DIN EN 14240 [36].

Die **Messtechnik** umfasst:

- Vier Temperatursensoren zum Messen der Lufttemperatur (in Bild 52 gekennzeichnet mit "6", in verschiedenen Höhen (0,1 m, 1,1 m, 1,7 m und 2,7 m))
- Ein Temperatursensor zur Erfassung der operativen Temperatur
- Temperatursensoren an den Aluminiumwänden zur Erfassung der Oberflächentemperatur
- Zwölf Heizlastsimulatoren, die als Wärmequelle arbeiten

Die **Kühldecke** bildet den Abschluss einer abgehängten Decke und ist an gekreuzten Aluminiumprofilen befestigt (vgl. Bild 53). Vier Kühlwasserkreise bestehend aus Beka 5-layers, Typ I/EVOH/PE-RT Plastikrohren sind mit Plastikclips an den Aluminiumprofilen befestigt.



Bild 53: Aluprofile und Kühlkreisläufe.

Die eigentliche **PCM-Schicht** ist eine Gipskartonplatte, in die sehr kleine PCM-Mikrokapseln eingearbeitet wurden. Diese bestehen aus einer Mischung aus Wachs und organischem Material. Für die statische und dynamische Simulation wurden jeweils drei verschiedene Platten verwendet:

- KNAUF Comfortboard 23 – GKB 12,5 mm (mit PCM)
- KNAUF Smartboard 23 – GKP 12,5 mm (mit PCM)
- KNAUF Thermoboard – GKF 10 mm (ohne PCM)

17.2.2 Simulationsmodell

Die Ergebnisse der Messungen innerhalb des Testraums müssen mittels thermischer Simulation repliziert werden, um so die Modelle zu verifizieren, die in Zukunft zur Analyse der PCM-Systemen verwendet werden sollen.

Die Simulation erfolgt mit dem Programm TRNSYS, der Testraum wurde mittels Type 56 (multi-zone-building) abgebildet. Für die Modellierung der PCM-Platten und des Kühlkreises wurde Type 399 (active/passive PCM wall) genutzt. Bild 54 zeigt die verwendeten Parameter dieser Modells.

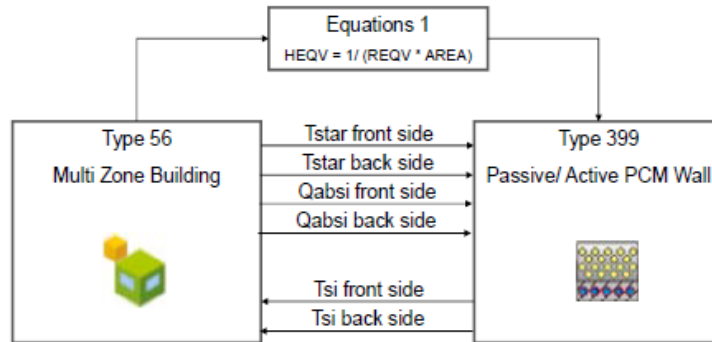


Bild 54: Verbindungen zwischen Type 56 und Type 399.

Innerhalb des **Type 56** wurde der Testraum entlang der PCM-Schicht in zwei Zonen zerlegt. Zunächst sollte die untere Zone in verschiedene Luftschichten (airnodes) zerlegt werden, um so die Temperaturen in den verschiedenen Höhen des Testraumes validieren zu können. Dieser Ansatz benötigt allerdings zusätzliche Informationen zur Luftströmung innerhalb des Testraumes, die nicht vorhanden sind und wurde daher nicht berücksichtigt.

Die Zonentemperaturen, die damit zur Validierung vorliegen und verglichen werden sind:

- $T_{\text{Luft,Raum}}$ (wird verglichen mit der gemessenen Temperatur in 1,1 m Höhe)
- $T_{\text{Luft,oberer Raum}}$ (wird verglichen mit der gemessenen Temperatur in 2,7 m Höhe)
- T_{operativ} (wird mit dem Messwert der operativen Temperatur verglichen)

Type 399 ist hinsichtlich der verwendeten Gleichungen und möglichen Geometrien relativ eingeschränkt und muss daher sehr genau konfiguriert werden um Unterbrechungen bzw. Fehler während der Simulation zu vermeiden. Zu diesem Zweck wurde ein Berechnungswerkzeug auf Basis von Excel entwickelt, welches die Eingabe-Parameter überprüft und ermittelt, ob diese simulationsfähig sind.

Unter Verwendung dieses Programms konnte gezeigt werden, dass der Code des Types einen Fehler bei der Berechnung des spezifischen Volumenstroms aufweist. Statt

$$m_{\text{spez}} = m / A_{\text{Wall}}$$

wird im Type

$$m_{\text{spez}} = m / A_{\text{Wall}} / n\text{Loops}$$

gerechnet. Dies führt bei mehr als einem Kühlkreis zu einem zu geringen Volumenstrom. Da der Type für die Simulation nicht korrigiert werden konnte, wurde mit einem statt vier Kühlkreisen simuliert.

Weiterhin mussten die Dicke und die Wärmekapazität der Aluminiumschicht angepasst werden. Bei einer zu geringen Schichtdicke kann TRNSYS nicht korrekt simulieren und daher wurde statt der eigentlich 0,6 mm starken eine 1 cm dicke Schicht angesetzt. Um dies zu kompensieren wurde die Wärmekapazität von 0,9 auf 0,15 KJ/kgK herabgesetzt.

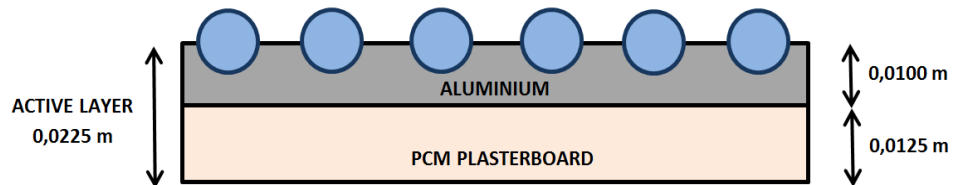


Bild 55: Schichtaufbau Type 399.

17.2.3 Statische Simulation

Um die Annahmen und die daraus resultierenden Parameter der beiden Types zu validieren, wurde zunächst eine statische Simulation mit festen Eingangsgrößen durchgeführt und diese Ergebnisse mit den Messergebnissen des Teststandes verglichen.

Dazu wurden bestimmte Messergebnisse (Massenstrom, Vorlauftemperatur und Wärmezufuhr) als Eingabe für die Simulation verwendet und die übrigen für die Validierung herangezogen. Hierbei wurden nur die PCM-Platten (Comfortboard und Smartboard) untersucht.

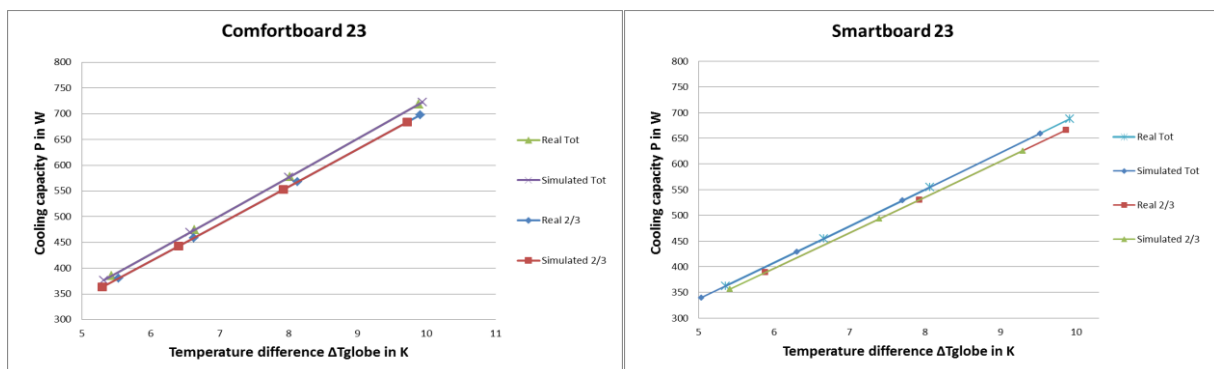


Bild 56: Vergleich der realen Daten mit den Ergebnissen der Simulation.

Wie in Bild 56 zu erkennen, konnten für das Smartboard und das Comfortboard die Messwerte mittels der Berechnungsergebnisse des Simulationsmodells nahezu deckungsgleich nachgebildet werden. Damit können die Modelle für den statischen Fall als validiert betrachtet werden.

17.2.4 Dynamische Simulation

Zur Prüfung, ob die Modelle auch in der dynamischen Betrachtung realitätsnahe Ergebnisse liefern, wurden die Modelle der drei Platten jeweils mit verschiedenen Leistungen beaufschlagt (532 W, 355 W und 177 W) und das Systemverhalten über die Zeit simuliert (Sprungantwort). Im Anschluss daran wurde wieder mit den Messwerten des Teststandes verglichen.

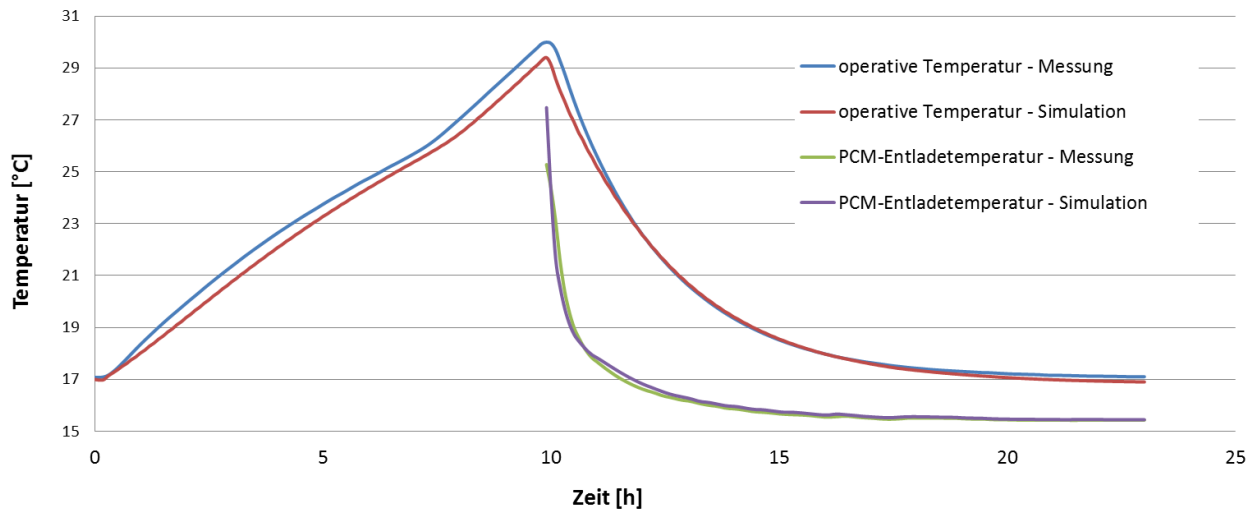


Bild 57: Vergleich der Messdaten mit den Ergebnissen der Simulation: operative Temperatur und PCM-Entladetemperatur.

Die Bewertung des thermischen Komforts ist in Bild 56 über die operative Temperatur wiedergegeben, dort zeigen sich bei Messung und Simulation gute Übereinstimmungen (Differenzen von maximal 0,2 K). Das technische Verhalten kann durch die PCM-Entladetemperatur beschrieben werden (Rücklauf), auch hier zeigt sich bei Messung und Simulation eine gute Deckung.

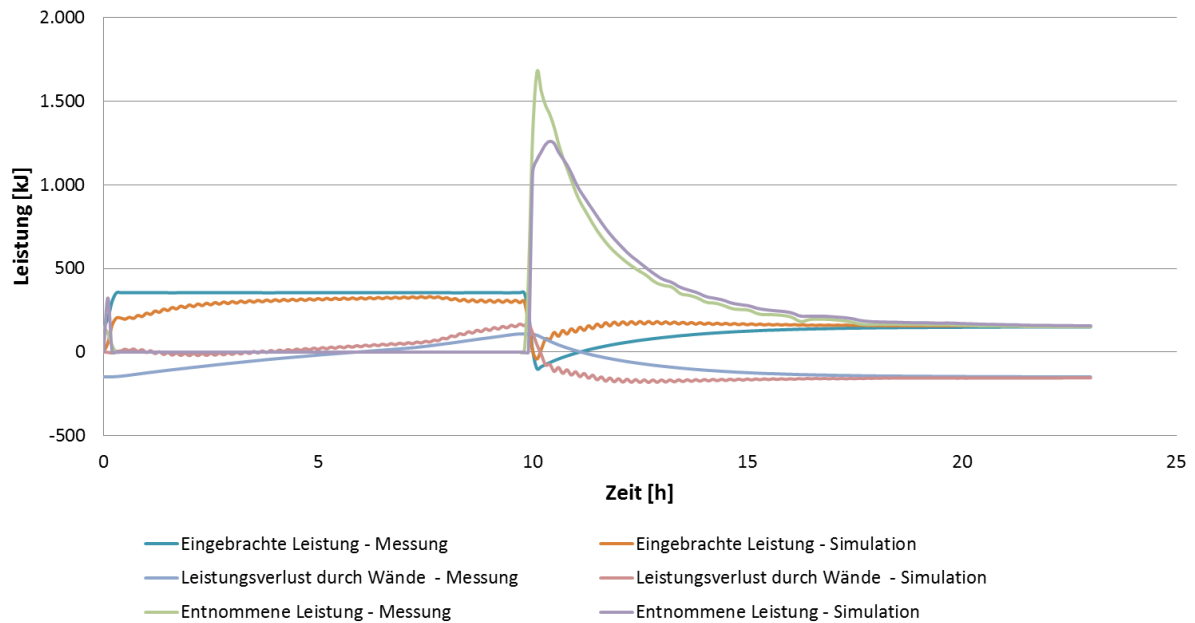


Bild 58: Vergleich des simulierten und gemessenen dynamischen Systemverhaltens des smartboard23 bei 355 W Leistung.

Wie aus Bild 58 ersichtlich, folgen die Trends der simulierten Ergebnisse sehr gut den gemessenen und das Modell kann als validiert betrachtet werden. Die Ergebnisse der anderen Platten und der verschiedenen Leistungsniveaus sind ähnlich, so dass das Modell damit auch für weitere Generalisierungen und andere PCM-Materialien einsetzbar ist.

Auch bei der thermoboard-Platte, die kein PCM enthält, liefert das Modell sehr gute Ergebnisse.

17.3 Validierung Lüftung

17.3.1 Datengrundlage der Validierung

Für die Validierung der Simulationsmodelle des PCM-Lüftungsgeräts wird kein eigenständiger Versuchsaufbau im Rahmen des hier beschriebenen Forschungsprojekts erstellt und messtechnisch untersucht. Stattdessen wird auf ein bestehendes intensives Monitoring zurückgegriffen, das am Land- und Amtsgericht Düsseldorf im Zeitraum vom Januar 2014 bis März 2015 durchgeführt wurde (BMW Förderkennzeichen 0327842A-D) [10]. Der in diesem Zusammenhang entwickelte zuluftintegrierte PCM-Speicher hat die Aufgabe, die Temperaturen und Wärmemengen, die während eines Betriebstages zur Verfügung stehen, sowohl während der Heiz- als auch während der Kühlperiode derart auszugleichen, dass der Primärenergiebedarf für Heizung und Kühlung reduziert wird. Dieser installierte PCM-Speicher ist in sechs parallele Stränge aufgeteilt, zwei für den Sommer- und vier für den Winterbetrieb. Von beiden Strangarten wird jeweils einer detailliert vermessen. Zusätzlich existiert eine Messung der Ge-

samtbilanz des Speichers. Eine schematische Darstellung des Speichers und der verfügbaren Messstellen findet sich in Bild 59.

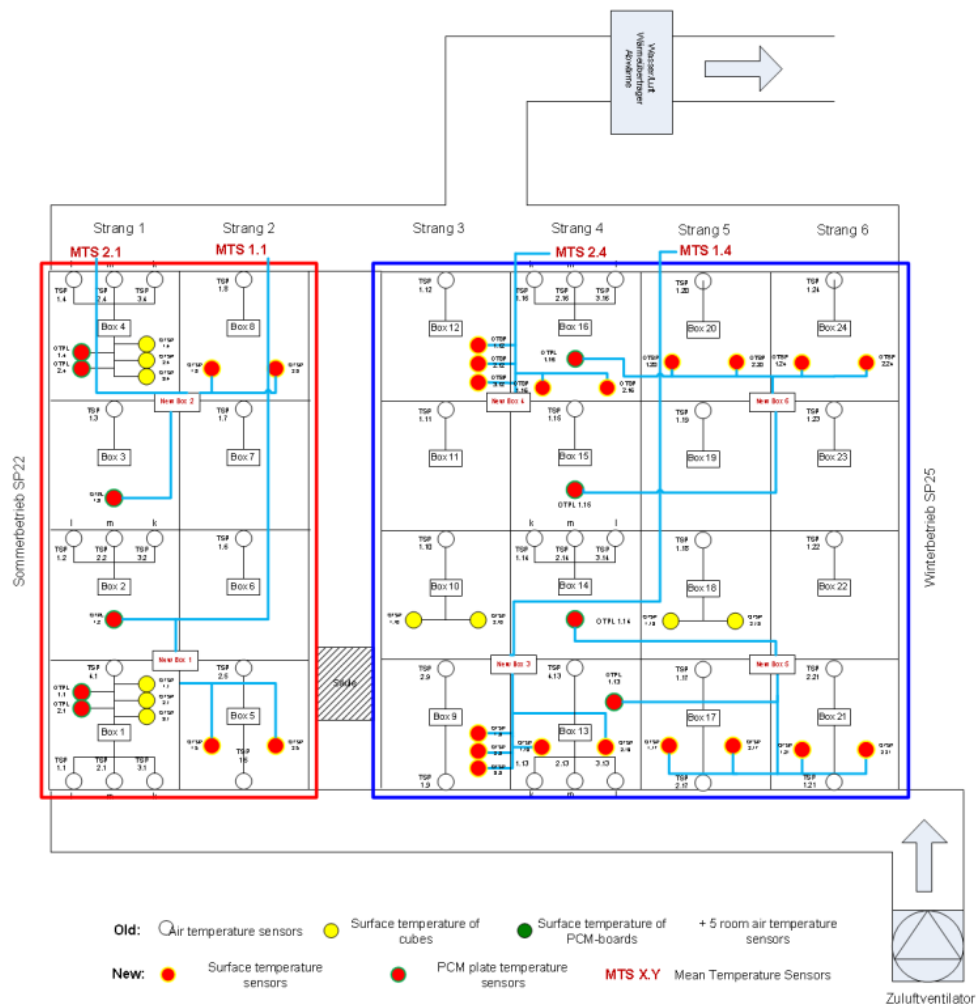


Bild 59: Schematische Darstellung des PCM-Speichers im Gebäude des Land- und Amtsgerichts Düsseldorf, inklusive der verfügbaren Messstellen des Monitorings des PCM-Lüftungs-Speichers [10].

Zur Unterstützung des Heizbetriebs wird der Speicher nachts mit permanent verfügbarer Abwärme in einem Umluftbetrieb beladen. In dem konkreten Fall des Düsseldorfer Gerichtsgebäudes wird hierzu die Abwärme der Kältebereitstellung der IT-Systeme und der Küchen-Kühlräume verwendet. Generell spielt die Quelle der genutzten Abwärme keine Rolle, solange sie innerhalb des PCM-Speichers Temperaturen oberhalb des Schmelzpunkts des gewählten PCM bereitstellen kann. Tagsüber wird die Frischluft zur Vorerwärmung durch den Speicher, dessen PCM zu diesem Zeitpunkt aufgeschmolzen ist, geleitet und anschließend final aufbereitet. Bei tieferen Außenlufttemperaturen wird ein zusätzlicher Erdwärmetauscher vor dem PCM-Speicher genutzt. Dieser Erdwärmetauscher beeinflusst zwar die Zulufttemperatur des PCM-Speichers, jedoch nicht sein internes physikalisches Verhalten. Aus diesem Grund wird der Erdwärmetauscher im Rahmen der Validierung nicht weiter betrachtet.

Zur Reduktion der anfallenden Kühlenergien Mengen des Verwaltungsgebäudes wird die Zuluft im Kühlfall über den erstarrten PCM-Speicher geleitet. Auch hier wird der Erdwärmetauscher zugeschaltet, falls die Außenlufttemperaturen steigen. Die Regeneration des aufgeschmolzenen PCM im Inneren des Speichers geschieht mit Hilfe der Durchströmung von kalter Nachtluft. Diese Luft ist nach der Regeneration des Speichers erwärmt und wird über einen Bypass wieder nach außen geleitet, da ein sinnvoller Einsatz zur Nachtlüftung des Gebäudes nicht möglich ist. Der Erdwärmetauscher, der auch bei der Validierung des Kühlfalls nicht betrachtet wird, wird hier an sehr warmen Tagen zu Unterstützung des PCM-Speichers verwendet. Die Darstellung eines messtechnisch erfassten Entladen- und eines Belade-Zyklus findet sich in Bild 60.

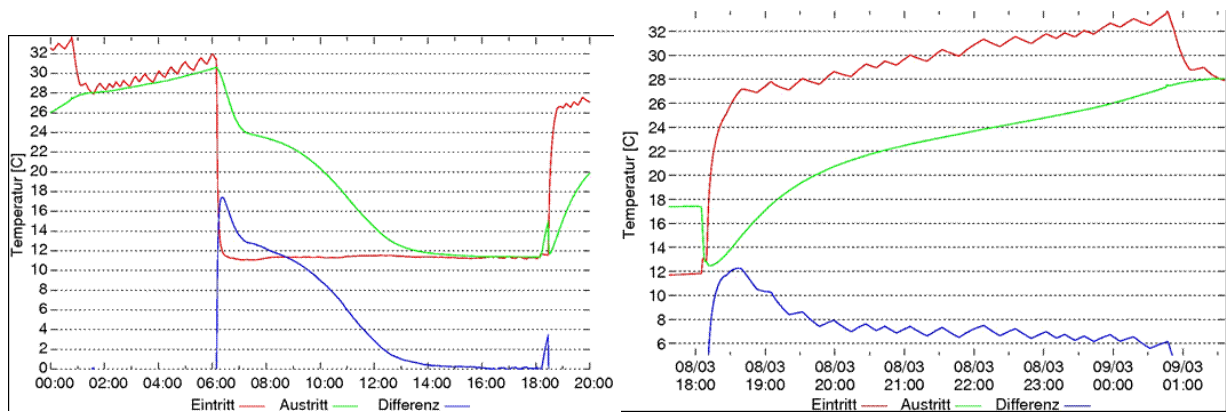


Bild 60: Beispielhafte Darstellung eines messtechnisch ermittelten Entlade- und Belade-Zyklus.

Links: Entladung bzw. Erstarren des PCM.

Rechts: Beladen bzw. Aufschmelzen des PCM.

17.3.2 Simulationsmodell

Das Ziel der hier beschriebenen Validierung ist ausschließlich die Validierung des PCM-Speichers und nicht die Validierung des Gesamtsystems der Lüftung des Gebäudes. Folglich wird als Systemgrenze der Validierung die Fort- und Zuluft des Speichers definiert. Es werden folglich die Reaktionen der Fortluft- und PCM-Temperaturen auf die vorherrschende Zulufttemperatur, den Luft-Volumenstrom und den aktuellen Ladezustand des Speichers bei der Validierung berücksichtigt. Die Zulufttemperatur und der Volumenstrom werden, basierend auf den Messdaten des Monitorings, dem Speicher aufgeprägt. Die aus dem Simulationsmodell resultierenden Reaktionen des Speichers werden mit den gemessenen Reaktionen aus denselben Monitoring-Daten verglichen. Die freien Parameter im Simulationsmodell werden derart justiert, dass eine gute Übereinstimmung zwischen beiden Verläufen existiert. Freie Parameter sind unter anderem die Wärmeübergänge der strömenden Luft im Inneren des Speichers zu den PCM-Paketen und zur Außenwand, die thermische Masse von nicht PCM-haltigen Konstruktionsmaterialien innerhalb des Speichers und das Oberflächen-Äquivalent der Schweißblaschen an den Rändern der PCM-Platten.

Wie das in Abschnitt 17.1.2 beschriebene Modell für die Kühldecke wird das in Bild 61 dargestellte Modell des PCM-Lüftungsgeräts innerhalb der TRNSYS Simulationsumgebung mit Hilfe des Type 399 modelliert. Der luftbasierte PCM-Speicher besteht aus einer thermischen Zone die sowohl eine externe wie auch eine interne Wand aufweist. Die externe Wand entspricht in ihrer Fläche und in ihrem Aufbau der Speicherwand und dient zur Modellierung bzw. Berücksichtigung der thermischen Verluste des Speichers an die Umgebung. Die interne Wand dient, unter Verwendung von TYPE 399, zur Simulation der plattenförmigen PCM-Container. Hierbei werden nicht die einzelnen PCM-Platten simuliert, um den numerischen Rechenaufwand in der folgenden Simulationsstudie zu begrenzen. Stattdessen werden diese Platten zu einer einzigen internen Wand zusammengefasst, die bezüglich des Volumens, des PCM-Gehalts und der wärmeübertragenden Oberfläche identisch mit der Summe der verwendeten PCM-Platten ist.

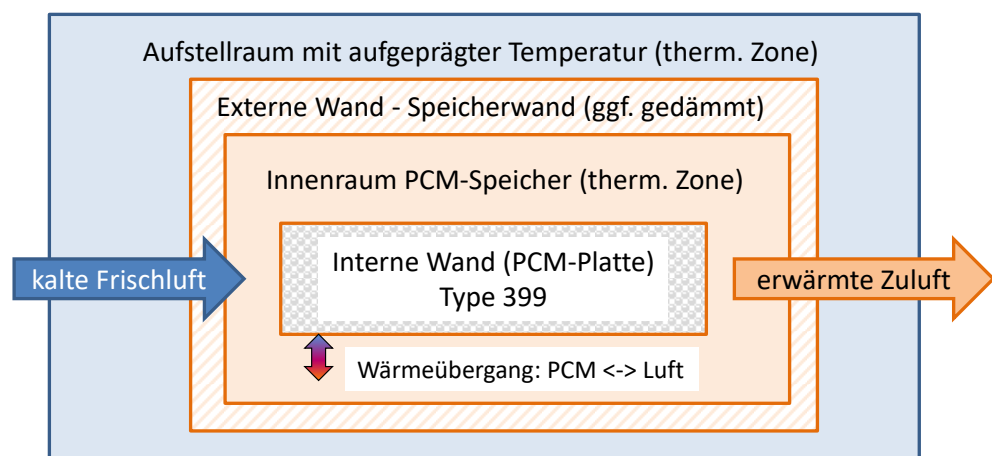


Bild 61: Schematische Darstellung des TRNSYS-Simulationsmodells des luftbasierten PCM-Speichers.

In einem ersten Schritt wird der theoretische Wärmübergang an den Platten berechnet. Hierfür werden die Luftspalte zwischen den einzelnen PCM-Platten als rechteckiger Lüftungskanal behandelt und die Methode nach Schack [37] angewendet; siehe Gleichung (14). Die mittlere Fluidtemperatur und die Luftgeschwindigkeit werden der Simulation, separat für jeden Cube, als Eingangsvariablen entnommen, wobei angenommen wird, dass $\frac{1}{4}$ des Luftvolumens durch den betrachteten Strang strömt.

$$\alpha_K = \left[4,13 + 0,23 * \frac{t_f}{100} - 0,0077 * \left(\frac{t_f}{100} \right)^2 \right] * \frac{w_0^{0,75}}{\sqrt[4]{d_h}} \quad (14)$$

α_K	Konvektiver Wärmeübergang im Kanal	[W/(m²K)]
t_f	Mittelwert der Fluidtemperatur am Ein- und Austritt	[°C]
w_0	Fluidgeschwindigkeit bei Normalbedingung (0 °C, 1,013 bar)	[m/s]
d_h	hydraulischer Durchmesser (Charakteristische Länge); $d_h = 2ab/(a+b)$	[m]

Im Rahmen der Modell-Kalibrierung werden die simulierten und die gemessenen Temperaturen am Übergang vom 2. zum 3. Cube des 4. Strangs betrachtet. Diese Stelle wird gewählt, da hier eine dreifache Messstelle zur Mittelwertbildung zur Verfügung steht. Am Ende dieses Strangs steht ebenfalls eine 3-fach Messstelle zur Verfügung, allerdings sind hier v.a. bei theoretisch deaktiviertem Lüfter unerklärliche Temperaturänderungen erkennbar, die unter Umständen aus nicht erfassten thermisch induzierten Luftströmungen, ggf. durch die Nachbarkanäle, entstehen. Das Modell wird derart kalibriert, dass die gemessenen und simulierten Temperaturverläufe möglichst gut übereinstimmen. Es resultiert Gleichung (15). Die hier erkennbare Verdoppelung des konvektiven Wärmeübergangs ist typisch für kurze Rohrstrecken [37].

$$\alpha_K = 2,0 * \left[4,13 + 0,23 * \frac{t_f}{100} - 0,0077 * \left(\frac{t_f}{100} \right)^2 \right] * \frac{w_0^{0,75}}{\sqrt[4]{d_h}} \quad (15)$$

α_K	Konvektiver Wärmeübergang im Kanal	[W/(m²K)]
t_f	Mittelwert der Fluidtemperatur am Ein- und Austritt	[°C]
w_0	Fluidgeschwindigkeit bei Normalbedingung (0 °C, 1,013 bar)	[m/s]
d_h	hydraulischer Durchmesser (Charakteristische Länge); $d_h = 2ab/(a+b)$	[m]

In Bild 62 kann man für den gewählten Cube 2 den Vergleich der simulierten und der gemessenen Lufttemperaturen am Austritt erkennen. Es zeigt sich v.a. bei den minimalen und maximalen Tagestemperaturen und auch bei der Temperaturverteilung eine gute Übereinstimmung. In Bild 63 ist der Vergleich der Temperaturen der PCM-Platten mit ebenfalls akzeptablen Übereinstimmungen dargestellt. Allerdings kann man erkennen, dass in Zeiten in denen nach den Messdaten Luftaustausch im PCM-Speicher vorhanden sein sollte in den Messdaten dennoch eine Veränderung erkennbar ist.

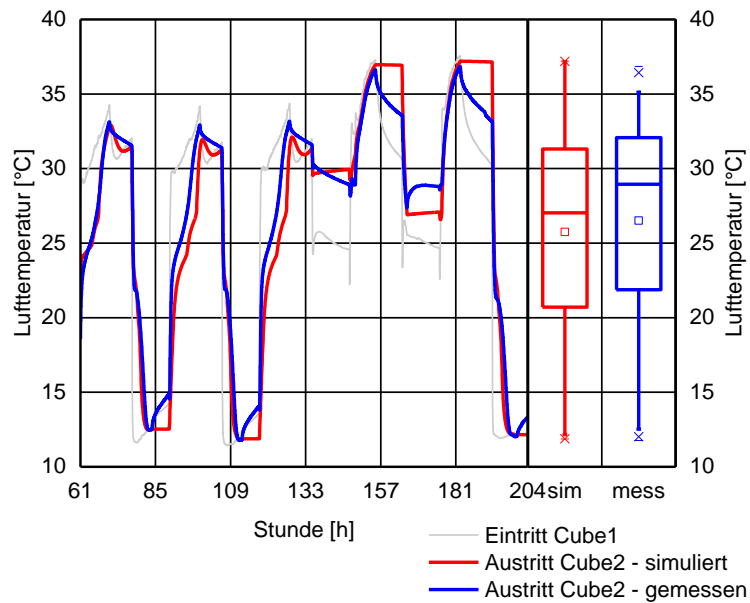


Bild 62: Vergleich der Verläufe und der Verteilungen der simulierten und gemessenen Lufttemperaturen am Auslass des Cube 2 von Strang 4.

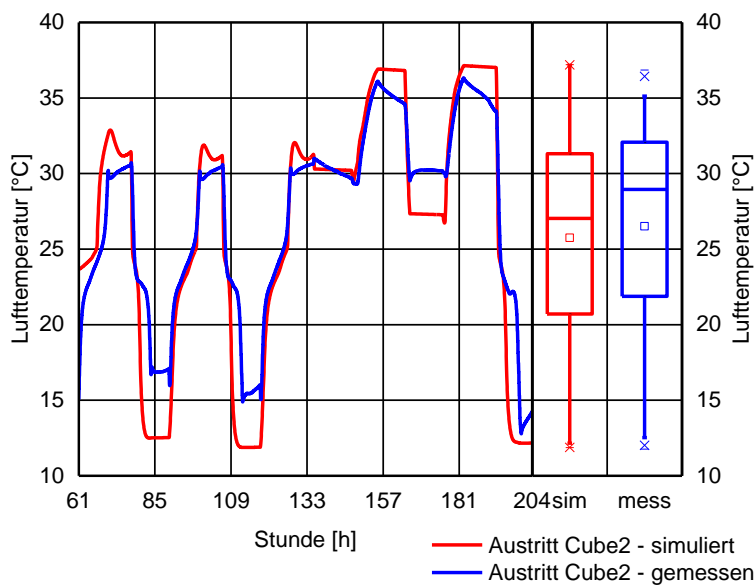


Bild 63: Vergleich der Verläufe und der Verteilungen der simulierten und gemessenen PCM-Temperaturen im Cube 2 von Strang 4.

Die hier dargestellten Ergebnisse der Kalibrierung zeigen, dass der gewählte Modellierungsansatz die thermodynamischen Prozesse eines lüftungsintegrierten PCM's ausreichend genau abbilden kann, um die Ergebnisse der Simulationen wiederum in ein stark vereinfachtes Verfahren zur Bewertung unterschiedlicher realer Bausituationen überführen zu können.

Kreuzvalidierung

Um die Qualität der Modellkalibrierung zu überprüfen, wird die Übereinstimmung des Modells nicht nur an dem zur Kalibrierung verwendeten Datensatz validiert sondern, im Rahmen der Kreuzvalidierung, auch an einem zweiten Datensatz. Die entsprechenden Luft- und PCM-Temperaturverläufe sind in Bild 64 und Bild 65 dargestellt. Erwartungsgemäß sind die hier erkennbaren Übereinstimmungen geringer als mit dem zur Kalibrierung verwendeten Datensatz, liegen jedoch immer noch in derselben Größenordnung.

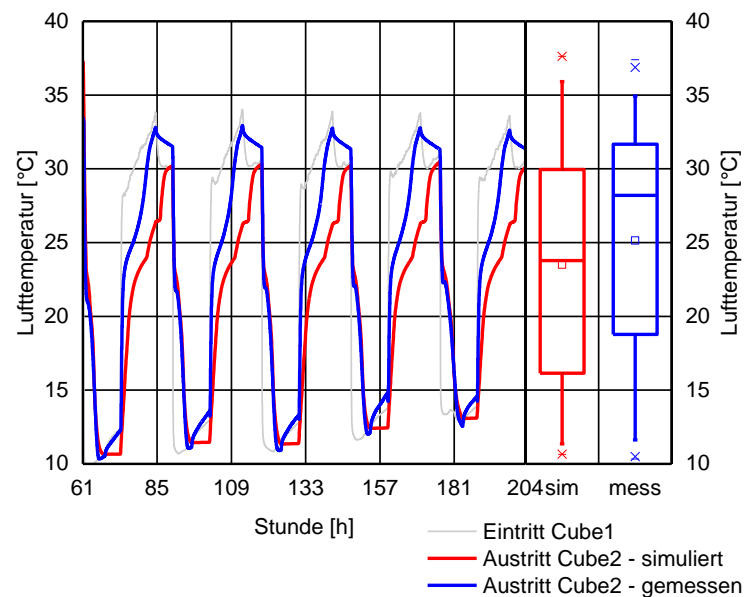


Bild 64: Vergleich der Verläufe und der Verteilungen der simulierten und gemessenen Lufttemperaturen am Auslass des Cube 2 von Strang 4 für den Datensatz der Kreuzvalidierung.

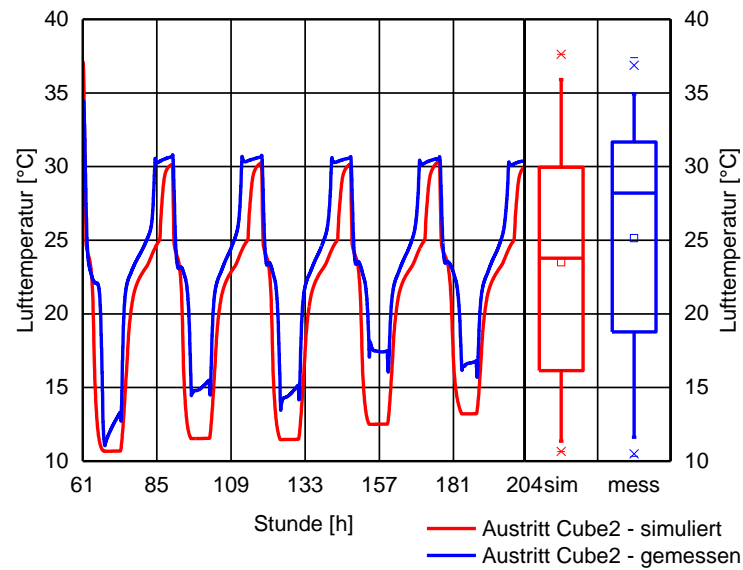


Bild 65: Vergleich der Verläufe und der Verteilungen der simulierten und gemessenen PCM-Temperaturen im Cube 2 von Strang 4 für den Datensatz der Kreuzvalidierung.

Angesetzte Wärmeübergänge:

Je nach vorliegendem Luftvolumenstrom bzw. Strömungsgeschwindigkeit liegen die ermittelten Wärmeübergänge bei 23,5 bzw. 40 W/(m²K). Zur Modellierung des PCM-Puffers im Rahmen der Studie wird ein mittlerer Wärmeübergang von 40 W/(m²K) festgelegt.