

**Numerische und experimentelle Untersuchung von
Phasenübergangsmaterialien
zur Reduktion hoher sommerlicher Raumtemperaturen**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen
der
Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

Dipl.-Ing. (FH) M.Sc. Sabine Hoffmann

geb. am 29. August 1972, Illertissen

Weimar, September 2006

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Mitarbeiterin des Lehrstuhls Bauphysik der Bauhaus-Universität Weimar.

Mein besonderer Dank geht an Prof. Dr. Oliver Kornadt für die Betreuung dieser Arbeit, die Bereitstellung optimaler Arbeitsbedingungen und die vielen wichtigen Anregungen.

Dr. H.-J. Flammersheim von der Friedrich-Schiller-Universität Jena möchte ich herzlich für die Zusammenarbeit im Bereich DSC-Messungen danken.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls Bauphysik gilt mein Dank für ihre Kollegialität und fachliche Unterstützung: Dr. Richard Rudolph und Dr. Ulf-Jürgen Werner für wichtige Hinweise und Diskussionen, Dipl.-Ing. Bernward Waldhelm für seine Mitarbeit im Teilprojekt C5 des Sonderforschungsbereiches SFB 524 und Dipl.-Ing. Conrad Völker für das Korrekturlesen und die inhaltlichen Diskussionen.

Nicht zuletzt geht ein besonderer Dank an meine Eltern, die mir in den letzten Jahren stets eine breite Unterstützung zukommen ließen.

Inhaltsverzeichnis

1	Problematik des sommerlichen Wärmeschutzes	4
1.1	Trends im Büro- und Verwaltungsbau	5
1.2	Energie- und umweltpolitische Prämissen	6
1.3	Rechtliche und normative Situation	6
2	Stand der Forschung	8
2.1	Thermische Behaglichkeit und Raumklima	8
2.2	Einsatzgebiete von Phasenübergangsmaterialien	10
2.3	Geschichte der PCM-Forschung im Bauwesen	10
2.4	Zentrale Latentwärmespeicher	11
2.5	Dezentrale Latentwärmespeicher zur Reduktion des Heizwärmebedarfs	12
2.6	Dezentrale Latentwärmespeicher zum sommerlichen Wärmeschutz	13
2.6.1	Experimentelle PCM-Forschung	13
2.6.2	Mathematische und numerische Modelle	16
2.6.3	Gebäudesimulationen	17
2.6.4	Vorarbeiten des Teilprojekts C5 des Sonderforschungsbereiches (SFB) 524 an der Bauhaus-Universität Weimar	18
3	Materialien mit Phasenübergang	19
3.1	Grundlagen der Wärmespeicherung	19
3.1.1	Sensible Wärmespeicherung	19
3.1.2	Latente Wärmespeicherung beim Phasenübergang fest - flüssig	19
3.1.3	Unterkühlung	22
3.2	PCM für den Einsatz in Gebäuden	23
3.2.1	Überblick über gängige PCM-Gruppen	23
3.2.2	Anforderungen an PCM	24
3.3	Mikroverkapselter PCM-Putz	25
3.3.1	Paraffine	25
3.3.2	Mikroverkapselung	26
3.3.3	Temperaturleitfähigkeit im festen und flüssigen Zustand	26
3.3.4	DSC-Messungen des PCM-Putzes	28
3.3.5	Approximation der DSC-Messungen	30
3.4	Modifiziertes Calcium-Chlorid-Hexahydrat	32
3.4.1	Chemische Modifikation	32
3.4.2	Phasenseparation des modifizierten $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	33
3.4.3	Unterkühlung des modifizierten $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	33
4	Mathematische Beschreibung des Phasenübergangs	35
4.1	Analytische Lösung	35
4.1.1	Exakte Lösungen des Phasenübergangs erster Art	35
4.1.2	Näherungsweise Lösungen des Phasenübergangs erster Art	39
4.2	Numerische Lösung	41
4.2.1	Finite-Differenzen-Verfahren zur Lösung der Wärmeleitungsgleichung (konst. Koeff.)	41
4.2.2	Wärmekapazität als Funktion der Temperatur	43
4.2.3	Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Temperatur	44
4.2.4	Stabilität und Abbruchfehler	45
4.2.5	Behandlung der Unterkühlung	46

5	Temperaturprofile ein- und zweischichtiger Wandaufbauten	48
5.1	Qualitative Betrachtung des Temperaturverlaufs in PCM-Bauteilen	49
5.1.1	Oberflächentemperaturen	49
5.1.2	Temperaturprofile	49
5.2	Quantitative Beurteilungskriterien	51
5.2.1	Oberflächen-Temperaturamplitudenverhältnis (OF-TAV)	51
5.2.2	Effektive Wärme	51
5.2.3	Eindringtiefe	52
5.3	Variation der Temperaturleitfähigkeit	52
5.3.1	Wärmeleitfähigkeit – konstante Werte	52
5.3.2	Wärmeleitfähigkeit – variable Werte	55
5.4	Maximal nutzbare Schichtdicke und Eindringtiefe	57
5.5	Temperatur des Phasenübergangs (Rechteck-Funktion)	58
5.6	Zweischichtige PCM-Bauteile mit kontinuierlichem Phasenübergang	59
5.6.1	Variation des Phasenübergangsbereichs $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$	60
5.6.2	Wärmeübergang	61
6	Gebäudesimulation zur Bestimmung des Raumklimas	63
6.1	Das Gebäudesimulationsprogramm ESP-r	63
6.2	Implementierung eines PCM-Moduls in ESP-r	63
6.2.1	Prinzip von SPMPCPC54 und SPMPCPC55	64
6.2.2	Variation der spezifischen Wärmekapazität	65
6.2.3	Variation der Wärmeleitfähigkeit	66
6.2.4	Überprüfung des Programms	66
6.2.5	Örtliche und zeitliche Diskretisierung	67
6.3	Klimatische Randbedingungen	67
6.3.1	Testreferenzjahr DWD	69
6.3.2	Messdaten	69
7	Validierung des numerischen Modells	71
7.1	Testräume im „Eiermann-Bau“	71
7.2	Validierungsklimadatensatz	74
7.3	Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen	76
7.4	Beurteilung der Validierung	78
7.5	Messergebnisse	78
8	Simulation des Raumklimas mit PCM	80
8.1	Einflüsse auf das Raumklima	80
8.1.1	Solareintrag	80
8.1.2	Wärmeübergang	81
8.1.3	Klimadatensätze	82
8.2	Optimierung des PCM	82
8.2.1	Peak-Temperatur	82
8.2.2	Latentwärme	85
8.2.3	Wärmeleitfähigkeit	86
8.2.4	Schichtdicke des PCM	87
8.3	Nutzungsverhalten	88
8.3.1	Lüftung	88
8.3.2	Verschattung	91
8.4	Räume und Raumtypen	93
8.4.1	Zellenbüro	93
8.4.2	Orientierung	94

9	Empfehlungen	96
9.1	Empfehlungen für Planer	96
9.1.1	Erzielbare Temperaturreduktion durch PCM-Putz	96
9.1.2	Nutzbare Schichtdicke	98
9.2	Empfehlungen zur Optimierung von PCM	99
9.2.1	Einstellung der Phasenübergangstemperatur	99
9.2.2	Einstellung der Wärmeleitfähigkeit	100
10	Schlussbetrachtung	101
10.1	Zusammenfassung	101
10.2	Fazit	105
10.3	Ausblick	106
 Nomenklatur		 107
 Literaturverzeichnis		 108
 ANHANG 1		 114
ANHANG 2		117
ANHANG 3		123
ANHANG 4		126
ANHANG 5		135
ANHANG 6		136
ANHANG 7		138
ANHANG 8		139
ANHANG 9		142
ANHANG 10		146
ANHANG 11		169
ANHANG 12		173

1 Problematik des sommerlichen Wärmeschutzes

Der Begriff des winterlichen Wärmeschutzes ist über bauphysikalisch und bautechnisch interessierte Kreise hinaus weitestgehend bekannt. Winterlicher Wärmeschutz bedeutet die Minimierung des Wärmedurchgangs vom wärmeren Temperaturniveau im Raum durch die Gebäudehülle zum kälteren Außenklima, die Minimierung des ungewollten Austausches warmer Innenluft mit kalter Außenluft durch Undichtigkeiten und Druckunterschiede und eine optimierte Ausnutzung der Solarstrahlung zur Erwärmung des Raumes mittels transparenter Außenbauteile.

Maßnahmen zum winterlichen Wärmeschutz, die den Heizwärmebedarf eines Gebäudes reduzieren, sind aus rechtlichen, gesellschaftlichen und ökonomischen Gründen inzwischen fest etabliert. Die Novellierung der Wärmeschutzverordnung im Jahre 1995 (WSVO '95) [1] und die Einführung der Energieeinsparverordnung im Jahre 2002 (EnEV) [2] haben die Bauindustrie gezwungen, ihre Bauausführungen im Hinblick auf die gebäudespezifischen Transmissions- und Lüftungswärmeverluste und bezüglich der Energieeffizienz eingesetzter Anlagentechnik zu optimieren. Bereits kurz nach Einführung der WSVO '95 wurde in Ausschreibungen kommunaler Bauprojekte aber auch im Rahmen privater Bauprojekte häufig ein so genannter Niedrigenergiehaus-Standard gefordert. Dieser beinhaltete eine 25 %ige Unterschreitung des Heizwärmebedarfs der WSVO '95 und führte maßgeblich dazu, dass in den letzten zehn Jahren der Wärmedurchgangswiderstand opaker und transparenter Außenbauteile fast kontinuierlich anstieg. Dieser Niedrigenergiehaus-Standard, der später die Grundlage für die Anforderungen der EnEV darstellte, konnte sich aufgrund des öffentlichen Bewusstseins für die Notwendigkeit von Energiesparmaßnahmen behaupten. Besonders angesichts der gestiegenen und weiter steigenden Energiepreise ist die Akzeptanz für Maßnahmen zum winterlichen Wärmeschutz und damit zur Reduktion der Betriebskosten eines Gebäudes bei kommunalen, institutionellen und privaten Auftraggebern hoch.

Der sommerliche Wärmeschutz dagegen hat im gemäßigten Klima West- und Mitteleuropas bisher nicht die gleiche Aufmerksamkeit erfahren. Sommerlicher Wärmeschutz beinhaltet die Reduktion der Wärmelast eines Raumes, die maßgeblich durch den Solareintrag durch transparente Flächen und die im Raum durch Nutzung entstehenden internen Lasten bestimmt wird. Der stationäre Wärmedurchgangskoeffizient der opaken Außenbauteile ist aufgrund der typischerweise vorherrschenden Temperaturverhältnisse im Sommer¹ von etwas geringerer Bedeutung, während eine Erhöhung der Wärmespeicherfähigkeit der Raumbegrenzungsflächen und der Außenbauteile und ein den Temperaturverhältnissen angepasstes Lüftungsregime zu den wichtigen Faktoren des sommerlichen Wärmeschutzes gehören.

Obwohl den am Bau Beteiligten natürlich die Notwendigkeit zur Einhaltung eines bestimmten Innenraumklimas auch im Sommer bewusst ist, erfahren die Nutzer eines Gebäudes die Bedeutung eines gelungenen sommerlichen Wärmeschutzes häufig erst dann, wenn dieser nicht geglückt ist und entsprechend unbehagliche Temperaturen auftreten. Während der Winterfall für die Bauausführenden durch die Normen eindeutig geklärt ist, ist die Situation im Hinblick auf den sommerlichen Wärmeschutz etwas kontroverser und die entsprechenden Normen weniger detailliert. Die ökonomische

¹ Beispiel: Temperaturdifferenz im Winter: $\theta_i = 20^\circ\text{C}$, $\theta_a = -15^\circ\text{C}$, $\Delta\theta = 35\text{ K}$
 Temperaturdifferenz im Sommer: $\theta_i = 26^\circ\text{C}$, $\theta_a = 36^\circ\text{C}$, $\Delta\theta = 10\text{ K}$

Bedeutung von sommerlicher Überhitzung in Gebäuden wird durch Gerichtsurteile unterstrichen, die bei Nichteinhaltung gewisser Raumtemperaturen kostspielige Nachrüstungen mit Klimatisierung verlangen.

1.1 Trends im Büro- und Verwaltungsbau

Die Entwicklung im Bauwesen ist, wie in anderen Industriezweigen auch, durch Kosten- und Zeiteffizienz bestimmt. Kosteneffizienz heißt für Bürogebäude, speziell in den attraktiven Innenstadtbereichen mit hohen Grundstückskosten und beschränktem Platzangebot, eine Orientierung in die Höhe. Zusätzliche konstruktive Lasten, die nicht Eigenlasten des Tragwerkes sind, werden so gut wie möglich vermieden und nicht tragende Bauteile daher in Leichtbauweise hergestellt. Die Forderung nach Flexibilität in der Gebäudenutzung bzw. in der Innenraumaufteilung bei Neu- bzw. Wiedervermietung lässt mobile Innenwandkonstruktionen immer häufiger zum Einsatz kommen. Damit sind die Innenwände als Speichermasse zur Pufferung hoher Spitzentemperaturen im Sommer nicht wirksam. Die Kabel- und Rohrleitungsführung in einer abgehängten Decke koppelt die thermische Masse einer massiven Decke vom Raumluftvolumen ab. Die Räume in Büro- und Verwaltungshochhäusern verfügen daher häufig nur noch über den Boden als signifikante Speichermasse.

Die elektronische Datenverarbeitung mit Computertechnik inkl. ihrer Peripheriegeräte zieht hohe interne Wärmelasten im Büroraum nach sich, da die elektrische Leistung von PCs, Druckern, Faxgeräten etc. zu einem beträchtlichen Anteil in Wärme umgesetzt und entweder konvektiv durch Lüfter oder in Form von Wärmestrahlung an ihre Umgebung abgegeben wird. Die durch elektrische Geräte und Beleuchtung entstehenden internen Lasten werden durch die latente und sensible Wärmeproduktion der Nutzer ergänzt und tragen ebenso zur Kühllast eines Raumes bei.

Aus architektonischen Gründen werden die meisten Bürogebäude mit hohem Verglasungsanteil in der Fassade gebaut. Fensterflächenanteile in der Außenfassade von 50 % bis 100 % sind für Büroräume durchaus üblich. Bei entsprechender Orientierung (Süd-Ost, Süd, Süd-West, West) und fehlender Verschattung durch Nachbargebäude oder Sonnenschutzmaßnahmen wird der Solareintrag zur bestimmenden Ursache sommerlicher Überhitzung.

Um den solaren Wärmeeintrag in einen Raum zu minimieren, wird im Allgemeinen ein innen- oder außenliegender Sonnenschutz angebracht, wobei letzterem aus bauphysikalischer Sicht nach Möglichkeit immer der Vorzug zu geben ist. Während außenliegender Sonnenschutz besonders effektiv ist, da er je nach Dichtigkeit des gewählten Stoffes die Transmission von Strahlung deutlich reduziert, wirkt ein innenliegender Sonnenschutz, indem er die bereits durch die Verglasung transmittierte Strahlung am Durchgang in das Rauminnere hindert. Die Luft zwischen dem innenliegenden Sonnenschutz und der Verglasung erwärmt sich dabei stark und führt in Form von Wärmeleitung und Konvektion Wärme über den Sonnenschutz an das Rauminnere ab.

Außenliegender Sonnenschutz kann aus Gründen des Windsogs bei entsprechender Exposition ab einer bestimmten Gebäudehöhe nicht mehr verwendet werden. Auch Doppelfassaden stellen hierfür keine befriedigende Lösung dar [3].

Bei Bürogebäuden, die mit einer Lüftungsanlage ausgestattet sind, bietet sich eine Erhöhung des Luftwechsels während der Nacht, wenn die Außenlufttemperaturen unterhalb der Raumtemperaturen liegen, an. Diese Maßnahme ist umso effektiver, je mehr Speichermasse im Raum vorhanden ist.

Wichtig ist ein bedachtes Nutzerverhalten. Bei heißen Temperaturen sollte ein übermäßiger Luftaustausch mit der wärmeren Außenluft vermieden und der Sonnenschutz muss rechtzeitig betätigt werden. Sonnenschutzeinrichtungen werden inzwischen häufig über Strahlungs- und/oder Temperatursensoren geregelt, um unabhängig von den Nutzern frühzeitig eine Überhitzung des Raumes durch hohe Solareinträge zu vermeiden.

Die Klimatisierung von Büro- und Verwaltungsgebäuden ist dann notwendig, wenn die vorgenannten Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz nicht ausreichen oder bei der Planung und Bauausführung nicht entsprechend Berücksichtigung fanden. Eine in Decken- oder Wandbauteilen eingebaute Flächenkühlung hilft, die Kühllast des Raumes zu verringern. Ein Einbau von Raumluftkonditionierungsanlagen zur Einhaltung eines konkret definierten Raumklimas kann von Bauherren und Mietern gefordert werden, um eine Überschreitung bestimmter Grenztemperaturen zu verhindern.

1.2 Energie- und umweltpolitische Prämissen

Aus Gründen der Energieeinsparung und des Umweltschutzes ist ein erhöhter Energiebedarf, der beim Einsatz von Klimaanlage entsteht, zu vermeiden. Der Anteil des Bausektors am Primärenergiekonsum der Bundesrepublik beträgt bereits heute ca. 40 % [4]. Ein vermehrter Einbau von Raumluftkonditionierungsanlagen in Bürogebäuden würde diesen Prozentsatz deutlich ansteigen lassen. Damit verbunden wäre ein erhöhter CO₂-Ausstoß, insbesondere da der Großteil der zum Betrieb nötigen Sekundärenergie aus Elektrizität besteht und elektrischem Strom ein Primärenergiefaktor von ca. 3 zugeordnet wird.

Nach verschiedenen Studien [5, 6] über treibhauswirksame Gasverbindungen kommt der Kälte- und Klimatechnik eine Schlüsselrolle für die aktuelle und künftige Entwicklung der Fluor-Gas-Emissionen zu. Nach jüngsten Abschätzungen des IPCC² haben etwa 63 % der weltweiten F-Gas-Emissionen in Leckagen und ungeordneter Entsorgung von stationären und mobilen Anlagen zur Kälteerzeugung oder Klimatisierung ihren Ursprung [7].

Beide Nebeneffekte eines vermehrten Einsatzes von Klimaanlage, CO₂-Ausstoß und die Gefahr durch weitere Treibhausgase, sind im Rahmen des Umwelt- und Klimaschutz zu vermeiden, um den anthropogenen Anteil an der globalen Erwärmung zu minimieren. Der vorausgesagte Anstieg der Mitteltemperatur verschärft gleichzeitig die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz von Gebäuden [8]. Passive, energieneutrale Techniken und Methoden zur Reduktion von sommerlicher Überhitzung in Gebäuden sollten daher, in Zusammenhang mit einer vorausschauenden und bewussten Planung, anstelle von energieintensiver Raumklimatisierung gewählt werden.

1.3 Rechtliche und normative Situation

Für Räume ohne raumlufttechnische Anlagen sind die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz maßgeblich in der DIN 4108-2 [9] geregelt. Diese wurde nach Einführung des Nachweises mittels Sonneneintragskennwert innerhalb von vier Jahren dreimal erneuert. Problemstellungen wie z.B. Eckbüros (transparente Flächen an zwei Orientierungen) und in der Praxis schwer realisierbare

² IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

Anforderungen führten zu den Überarbeitungen. Dies zeigt die Unsicherheiten auf, die mit der Betrachtung des sommerlichen Wärmeschutzes einhergehen.

In der DIN 4108-2, die durch den § 3 Abs. 4 der EnEV in den Rang eines Gesetzes gehoben wird, wird ein Sonneneintragskennwert basierend auf dem Verhältnis der transparenten Fläche zur Grundfläche des Raumes, dem Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung und evt. Sonnenschutzvorrichtungen berechnet. Dem gegenüber gestellt wird ein maximal zulässiger Sonneneintragskennwert. Dieser bestimmt sich entsprechend der Klimaregion, der Bauart des Gebäudes (leichte oder schwere Bauausführung), der Orientierung, des Lüftungsregimes und evt. eingebauter spezieller Sonnenschutzverglasungen.

Die Klimaregionen sind auch bei dem in der DIN 4108-2 vorgegebenen 10 %-Kriterium von entscheidender Bedeutung. In welcher Klimaregion ein Gebäude beheimatet ist, entscheidet darüber, welche Grenztemperatur für die Überhitzungsstunden angesetzt werden muss. Diese Grenztemperatur darf an nicht mehr als 10 % der Aufenthaltszeit überschritten werden. Das 10 %-Kriterium wird aktuell im Allgemeinen dahin gehend interpretiert, dass sich der Begriff Aufenthaltszeit im Falle eines Büroraumes auf die gesamte Aufenthaltszeit eines Jahres bezieht. Dies bedeutet eine Gesamtaufenthaltszeit von 52 Wochen * 40 Std./Woche = 2080 Std. und damit maximal 208 Überhitzungsstunden [10].

Für Büroräume gilt neben der DIN 4108 auch die Arbeitsstättenverordnung [11]. Diese besagt, dass Raumtemperaturen an Arbeitsplätzen in der Regel eine Grenztemperatur von 26°C nicht überschreiten dürfen (Ausnahme: Außentemperatur > 32°C). Raumtemperaturen werden als operative Temperaturen definiert (s. Kap. 2.1). Eine Berücksichtigung dieser Grenztemperatur in der Rechtsprechung fand erstmals öffentliches Aufsehen in einem Entscheid des Bielefelder Landgerichts [12]. Eine Rechtsanwaltskanzlei hatte gegen zu hohe Temperaturen in den angemieteten Büroräumen geklagt, da häufig Lufttemperaturen von mehr als 26°C gemessen wurden. Der Vermieter wurde auf Abschaffung verklagt und musste dezentrale Klimatisierungseinrichtungen anbringen. Das Urteil ist seitdem aus bauphysikalischer Sicht umstritten, da eine rigorose Anwendung einer Temperaturgrenze zum vermehrten Einsatz von Klimaanlage führen würde [13].

2 Stand der Forschung

2.1 Thermische Behaglichkeit und Raumklima

Als thermische Behaglichkeit wird die Abwesenheit von Störungen, die eine Regulierung und Adaption des Körpers an den thermischen Zustand erfordern, bezeichnet. Der ASHRAE-Standard 55 [14] definiert den Zustand der thermischen Behaglichkeit folgendermaßen: „Thermal comfort is that condition of mind, which expresses satisfaction with the thermal environment.“. In Europa gibt die DIN EN ISO 7730 [15] Richtlinien zur Beurteilung des thermischen Komforts. Beide Normen basieren in weiten Teilen auf empirischen Untersuchungen Fangers [16] in den 1970er und 1980er Jahren.

Nach Fanger hängt die thermische Behaglichkeit von folgenden Faktoren ab:

- Raumlufttemperatur
- Temperatur der Umgebungsflächen bzw. mittlere Strahlungstemperatur
- Luftfeuchte
- Luftgeschwindigkeit
- Bekleidungsgrad
- Aktivitätsgrad

Das Raumklima wird durch die im Raum vorherrschenden Lufttemperaturen, die Temperaturen der umgebenden Flächen, die direkt auf den Nutzer auftreffende Solarstrahlung, die Luftgeschwindigkeit an der betrachteten Stelle im Raum und die Luftfeuchte bestimmt. Es muss auf die nutzer- und nutzungsspezifischen Anforderungen wie durchschnittlicher Bekleidungsgrad und Tätigkeit im Raum abgestimmt sein, um thermische Behaglichkeit zu gewährleisten.

Neuere Untersuchungen erweitern Fangers Liste der den thermischen Komfort bestimmenden Größen um den Parameter des im Raum vorhandenen Lüftungs- bzw. Klimatisierungssystems. Es wurde festgestellt, dass die Erwartungshaltung der Nutzer an den thermischen Komfort im Falle einer Vollklimatisierung höher ist, während bei freier Lüftung die Toleranz gegenüber höheren Raumtemperaturen größer ist [17].

Verschiedene Untersuchungen ergaben eine steigende Akzeptanz gegenüber höheren, die Grenztemperatur von 26°C übersteigenden, Raumtemperaturen in Abhängigkeit von der Außentemperatur [18, 19]. Vorhersagen über den durchschnittlichen Prozentsatz an Unzufriedenen (PPD: Predicted Percentage of Dissatisfied) gemäß DIN EN ISO 7730 scheinen in klimatisierten Räumen das Empfinden von Testpersonen besser wiederzugeben als in Räumen mit freier Lüftung, wo das mittlere Votum (PMV: Predicted Mean Vote)³ für die real als thermisch behaglich empfundenen Temperaturen zu niedrig scheint [17]. Für klimatisierte Räume wurde ein verbesserter Algorithmus von [20] entwickelt, während für nicht klimatisierte Räume der ASHRAE-Standard zur Bestimmung der thermischen Behaglichkeit die beste Übereinstimmung mit Observationen in realen Gebäuden bringt [17].

³ PMV: Predicted Mean Vote [-3;3]. Ein PMV-Wert von 0 entspricht einer neutralen Temperaturempfindung, negative Werte stehen für ein als zu kalt empfundenen, positive Werte für ein als zu warm empfundenen Raumklima

Diese Erkenntnisse sind vielversprechend im Hinblick auf den Einsatz von Phasenübergangsmaterialien (phase change materials: PCM) zur passiven Kühlung anstelle von Klimatisierungsanlagen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die PCM, die in der vorliegenden Arbeit verwendet wurden, nur die Raumlufthtemperatur und die Oberflächentemperaturen der Umgebungsflächen beeinflussen; Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit werden nicht verändert und daher in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Geht man von einem Raumzustand aus, bei dem sich die Werte für Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit in einem thermisch neutralen⁴ Bereich befinden, sind Lufttemperatur und die Oberflächentemperaturen der Wand-, Decken- und Fensterflächen die für den thermischen Komfort entscheidenden Größen.

Das Temperaturniveau der umgebenden Luft bestimmt den Wärmeaustausch des Körpers mit der Raumlufth. Der Bekleidungsgrad entspricht dem Wärmedurchlasswiderstand zwischen Hautoberfläche und Luft. Die theoretische Bestimmung eines konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten wird über die Lösung der Navier-Stokes Gleichungen für laminare und turbulente Luftströmungen durchgeführt. Experimentell gefundene Abschätzungen für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten einer Wandfläche in einem Raum bei freier Konvektion bestimmten sich über die Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Luft [21, 22, 23]. Bei erzwungener Konvektion empfehlen sich empirische Gleichungen, die die Luftgeschwindigkeit im Raum berücksichtigen [24]. Vertikale und horizontale Flächen sind gesondert zu betrachten.

Der konvektive Wärmeübergang an der Oberfläche eines im Raum befindlichen Menschen hängt von weiteren Faktoren wie z. B. der Oberflächenstruktur und der durch die Bewegung entstehenden Luftströmung ab und kann nur schwer abgeschätzt werden.

Der menschliche Körper steht im langwelligen Strahlungsaustausch mit den ihn umgebenden Flächen. Ob dem Körper Wärme zugeführt oder entzogen wird, hängt von den Emissionskoeffizienten der Umgebungsflächen und der Bekleidung bzw. Hautoberfläche, den geometrischen Verhältnissen und der Oberflächentemperatur der im Austausch stehenden Flächen ab. Der Strahlungsaustausch folgt Gl. 2-1.

$$\dot{Q} = C_{12} \cdot A_1 \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad [2-1]$$

Dabei ist C_{12} der Strahlungsaustauschkoeffizient, der den Emissionskoeffizienten der im Austausch stehenden Flächen A_1 und A_2 sowie die geometrische Einstrahlzahl beinhaltet. Der Wärmeübergangskoeffizient für den Strahlungsaustausch kann aus Gl. 2-1 hergeleitet werden.

$$\alpha_{\text{str.}} = C_{12} \cdot (T_1^2 + T_2^2) \cdot (T_1 + T_2) \quad [2-2]$$

Große Temperaturunterschiede gegenüberliegender oder angrenzender Flächen führen zu unbehaglicher Strahlungssymmetrie. Sehr kalte Oberflächen lassen so genannte „Strahlungszug“-Erscheinungen entstehen, d. h. eine Person im Raum empfindet das Raumklima als unbehaglich kalt. Unterschreitet die Distanz zwischen Aufenthaltsort der Person und kalter Oberfläche eine kriti-

⁴ Nach DIN EN ISO 7730 gilt für Büroräume bei Temperaturen von 22°C - 27°C folgende empfohlene mittlere Luftgeschwindigkeit: 0.12 m/s (PPD < 6%; PMV < |0.2|) – 0.24 m/s (PPD < 15%; PMV < |0.7|)

sche Distanz (→ Erhöhung der geometrischen Strahlungszahl), kann dieses Kälteempfinden nicht mehr durch hohe Lufttemperaturen ausgeglichen werden.

Geht man davon aus, dass im Raum moderate Temperaturunterschiede zwischen Luft und Oberfläche der Umgebungsflächen vorherrschen, die nicht zu Strahlungsassymetrie oder Strahlungszug hervorrufenden Bedingungen führen, ergibt sich eine operative Raumtemperatur θ_{op} wie folgt:

$$\theta_{op} = \frac{\theta_{RL} \cdot h_{conv} + \bar{\theta}_{Str.} \cdot h_{Str}}{h_{conv} + h_{Str}} \quad [2-3]$$

Für die in Büro- und Aufenthaltsräumen üblichen Verhältnisse wird Gl. 2-3 meist vereinfacht zu:

$$\theta_{op.} = \frac{\theta_{RL} + \bar{\theta}_{Str.}}{2} \quad [2-4]$$

Die Gl. 2-4 zugrunde liegende Annahme basiert auf der schwierigen Abschätzung der tatsächlichen Wärmeübergangsverhältnisse. Im Falle von relativ geringer Luftbewegung ist anzunehmen, dass der Strahlungsanteil an der operativen Temperatur überwiegt, während bei hohen Luftgeschwindigkeiten der konvektive Wärmeübergang an Bedeutung gewinnt.

Bei der Beurteilung einer möglichen Verbesserung des Raumklimas durch den Einsatz von Phasenübergangsmaterialien wird im Folgenden sowohl die Lufttemperatur wie an geeigneter Stelle auch die operative Temperatur gemäß Gl. 2-4 herangezogen.

2.2 Einsatzgebiete von Phasenübergangsmaterialien

Phasenübergangsmaterialien als Latentwärmespeicher werden in vielen Bereichen eingesetzt. Tab. 2-1 listet, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, die wichtigsten Einsatzgebiete von PCM außerhalb des Bauwesens auf.

Automobilindustrie	Einbau von Latentwärmespeichern in den Kühlkreislauf von Motoren, um so die Abwärme des Motors für den nächsten Kaltstart zu nutzen und somit u. a. den Benzinverbrauch zu reduzieren
Catering	Warmhalteelemente für Speisen
Elektronik	Kühlung von elektronischen Bauteilen
Textilien	Funktionelle Bekleidung in den Bereichen Winter-, Motorrad- und Tauchsport

Tab. 2-1: Einsatzgebiete von Phasenübergangsmaterialien

2.3 Geschichte der PCM-Forschung im Bauwesen

Die ersten Versuche mit Phase Change Materials in Gebäuden begannen in den späten 1940er Jahren. Im Jahre 1946 wurde in der Nähe von Boston (USA) das so genannte „Dover House“ errichtet, ein barackenförmiges einstöckiges Gebäude. Ziel war es, auf eine Heizung im herkömmlichen Sinn zu verzichten und dennoch Raumtemperaturen in einem behaglichen Temperaturbereich zu erzielen. Solare Strahlungsenergie wurde in Luftkollektoren absorbiert und die erwärmte Luft wurde mit Hilfe eines Ventilators durch einen Luftschacht Heizbehältern zugeführt, die im Inneren des Gebäudes aufgestellt waren und mit einem Wärmetauscher versehen waren. Diese Behältnisse waren

mit jeweils fünf Gallonen (entspricht etwa 19 Litern) Glaubersalz gefüllt und ermöglichten es, Raumtemperaturen von 21°C selbst bei mehrtägig bedecktem Himmel aufrechtzuerhalten [25].

Ein ähnliches Projekt wurde, basierend auf den Erfahrungen des „Dover House“, in New Mexico durchgeführt. Hierbei handelte es sich um ein zweistöckiges Haus mit einer Wohnfläche von etwa 100 m². Ein Versuchshaus mit einer Wohnfläche von 111 m² auf zwei Etagen am „Royal Military College“ in Kanada wurde 1959 fertig gestellt. Die dort eingebrachten 12 Tonnen Glaubersalz wurden mit Natriumsilikat angedickt und enthielten korrosionshemmendes Chromat, da sich die Korrosion der Stahlbehälter als Problem der frühen Pilotprojekte herausstellte. Ähnlich dem Aufbau in den vorherigen Projekten wurde das PCM in senkrecht angeordnete Stahlröhren (100 mm x 600 mm) gefüllt [26].

Nach diesen ersten Versuchen, Phasenübergangsmaterialien als solar beladene Heizungselemente zu verwenden, entwickelte sich die PCM-Forschung in verschiedene Richtungen weiter. Mit Eintreten der ersten großen Ölkrise 1973, als die OPEC (Organisation Erdöl exportierender Länder) bewusst ihre Fördermengen drosselte, um den Preis für Erdöl zu ihren Gunsten zu beeinflussen, wandte sich die Wissenschaft verstärkt alternativen und erneuerbaren Energien zu. Dies brachte der PCM-Forschung einen erheblichen Aufschwung.

Auf den vorangegangenen Forschungen und Versuchen basierend wurde 1971 an der University of Pennsylvania ein neues Projekt gestartet, dessen Ziel es war, verschiedene organische und anorganische PCM zu finden, die sowohl für Heiz- als auch für Kühlsysteme geeignet sind. Diese Studie basierte auf Salzhydraten, organischen PCM und Hydratklathraten. Lane (1981) [27] führte in Zusammenarbeit mit Dow Chemical, Michigan, USA die bis dato wohl umfassendste Untersuchung zu Phasenübergangsmaterialien durch. Aus 20 000 betrachteten PCM wurden 200 Materialien genaueren Untersuchungen im Hinblick auf ihre thermischen Eigenschaften, ihr chemisches Verhalten und einen möglichen Einsatz in Gebäuden unterzogen.

2.4 Zentrale Latentwärmespeicher

PCM werden häufig in Langzeitspeichern eingesetzt, die die zuvor entweder solar oder mit billigem Nachtstrom elektrisch erzeugte Wärme speichern. Diese Anwendung kann sowohl zu Heiz- wie auch zu Kühlzwecken verwendet werden. Die Zeit, die durch Langzeitwärmespeicherung überbrückt werden kann, variiert von einigen Tagen bis zu mehreren Monaten.

In der Mitte der siebziger Jahre wurden in Deutschland erstmals Paraffine als Latentwärmespeicher verwendet. Die Firma Brown, Boveri & Cie. AG führte eine Untersuchung im Versuchsgebäude „BBC Solar House“ durch, in dem ein zentraler Paraffinspeicher für solare Heizwärme eingesetzt wurde [28].

Das Institut Studsvik Energiteknik in Schweden arbeitete an der Anwendung von Salzhydraten in Langzeitwärmespeichern zur Nutzung solarer Heizenergie. Die Salzhydrate wurden als Kügelchen mit Metall verkapselt und in Wassertanks und Stein-Wärmespeicher eingebracht. Ein Feldversuch wurde in Zusammenarbeit mit drei großen schwedischen Baufirmen zum Einsatz urbaner Fernwärme durchgeführt [29].

Das Unternehmen Cristopia bietet eine große Auswahl verkapselter PCM mit Phasenübergangstemperaturen von - 40°C bis + 60°C, die in einen Speicherbehälter gefüllt werden. Je nach Phasen-

übergangstemperatur können sie als „Kälte“- oder Wärmespeicher genutzt werden. Der Durchmesser der Kapseln beträgt 7 - 10 cm. Die Wärmespeicher sind zu 60 % mit PCM-Kapseln befüllt, 40 % des Speichers enthält Mono-Ethylen-Glycol als Wärmeträgerfluid [30].

Bo et al. (1999) [31] untersuchten Tetradecan und Hexadecan für den Einsatz in Langzeitspeichern für Fernkühlsysteme, die Stadtviertel versorgen (wie z.B. in Stockholm, Paris, London, Lyon). Sie bestätigen die Anwendung von DSC-Messungen als geeignet zur Bestimmung von Schmelz- und Erstarrungstemperatur von Alkanen.

Aktuelle Forschungsarbeiten zur Verbesserung anorganischer Phasenübergangsmaterialien werden im Rahmen des Förderkreises LWSNet durchgeführt [32]. LWSNet steht für „Netzwerk zur Überwindung grundlegender Probleme bei der Entwicklung hocheffizienter Latentwärmespeicher auf Basis anorganischer Speichermaterialien“. Projektziel ist die Überwindung von Unterkühlungseffekten anorganischer PCM, die Verbesserung des Volumen-zu-Oberfläche-Verhältnisses und die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit mikroverkapselungsfähiger PCM.

2.5 Dezentrale Latentwärmespeicher zur Reduktion des Heizwärmebedarfs

Im Gegensatz zu zentralen Wärmespeichern, die außerhalb des Gebäudes oder zumindest nicht im Wohnbereich aufgestellt werden, werden dezentrale Latentwärmespeicher im Gebäude selbst an den Stellen eingesetzt, an denen die Speichermasse benötigt wird.

Am französischen CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) wurden Anfang der 1980er Jahre verschiedene Projekte mit Phasenübergangsmaterialien durchgeführt. Dabei lag der Fokus auf der Nutzung und Speicherung von Solarenergie zur Reduktion des Heizwärmebedarfs. In Zusammenarbeit mit der Société Griesser wurden 1983/84 Sonnenschutz-Jalousien, die mit einem auf $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ basierenden Salzhydrat gefüllt waren, untersucht. Das Produkt setzte sich allerdings nicht durch und wurde Mitte der 1980er Jahre wieder aus dem Sortiment genommen [33, 34].

Eine „Dioden-Wand“ als Fassadenelement wurde in zwei Wohnhäusern von Wissenschaftlern des CNRS als Prototyp realisiert. Dabei diente eine einfache Verglasung vor einem mit Polyurethan gefüllten Paneel als Luftkollektor. Im Paneel befinden sich mehrere Rohrwärmetauscher, deren innere Rohre mit Chliariolith befüllt sind. Chliariolith ist ein modifiziertes Salzhydrat auf Basis von Calcium-Chlorid-Hexahydrat mit einem Schmelzpunkt von 28.5°C . Mittels Ventilatoren wird die im Solarkollektor erwärmte Luft durch das Außenrohr des Wärmetauschers geführt und somit der Latentwärmespeicher beladen. Das Wandelement gibt dann phasenversetzt zur Nachtzeit Wärme nach innen zum Raum und nach außen zur Außenluft ab [35].

In Annot, Frankreich, wurde ein so genanntes Solarhaus (maison solaire) mit einer Fußbodenheizung mit PCM ausgestattet, deren Latentwärmespeicher über solar erwärmte Luft beladen wird. Ähnlich der „Dioden-Wand“ wird die warme Luft über im Estrich befindliche Rohrwärmetauscher geführt, die mit Chliariolith befüllt sind. An strahlungsarmen Tagen wird das PCM über kostengünstigen Nachtstrom aktiviert [36].

An der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich wurde die Integration eines Salzhydrates in eine transparent wärmegeämmte Glasbausteinwand untersucht. Die zugrunde liegende Idee ist, durch transparente Wärmedämmung (TWD) und Glasbausteine eine transluzente Außenwand zu bilden, die Tageslichtnutzung zulässt und Solarenergie in PCM, das in die Glasbausteine integriert

ist, speichert. Im Unterschied zu anderen TWD-Systemen fehlt die schwarze Absorberschicht, an der die Strahlung in Wärme umgewandelt wird. Nur ein Teil der Strahlung wird im Glasbaustein und PCM in langwellige Wärmestrahlung umgewandelt, der Rest wird direkt in den Raum transmittiert oder an den Salzkristallen reflektiert [37].

Die Bauakademie Berlin hat experimentell Fassadenbauteile mit PCM auf der Basis von Glaubersalz untersucht. Dabei wurde eine mit einer transparenten Wärmedämmung (TWD) versehene Betonwand mit einem ebenfalls mit einem TWD-gedämmten PCM-Sandwichpaneel verglichen. Bei gleichem U-Wert sind die instationär berechneten Transmissionswärmeverluste des PCM-Paneels um 23 % geringer als die der Betonwand. Die Oberflächentemperaturen an der Innenwandoberfläche der PCM-Variante sind höher und die Wand gibt über einen längeren Zeitraum Wärme an den Innenraum ab [38].

2.6 Dezentrale Latentwärmespeicher zum sommerlichen Wärmeschutz

Während bis zu den 1980er Jahren der Fokus auf der Reduktion der Heizenergie durch PCM lag, beschäftigt sich die PCM-Forschung seit Anfang der 1990er Jahre vermehrt mit dem sommerlichen Wärmeschutz.

2.6.1 Experimentelle PCM-Forschung

Ein Einsatz von PCM in dezentralen Luft-PCM-Wärmetauschern einer Zu- und Abluftanlage wird von verschiedener Seite untersucht [39, 40]. Kalte nächtliche Außenluft führt im Wärmetauscher zur Erstarrung des PCM, dessen Schmelztemperatur mit 22°C - 25°C angegeben wird. Während des Tages wird die Außenluft im Wärmetauscher gekühlt, bevor sie als Zuluft in den Raum geleitet wird. Nach Zalba et al. (2004) [39] ist eine mindestens 15 K betragende Temperaturdifferenz der Außentemperatur zwischen Tag und Nacht Grundvoraussetzung für einen wirksamen Einsatz dieser PCM-Luftwärmetauscher. Zur Latentwärmespeicherung verwendet wird ein kommerzielles PCM der Fa. Rubitherm, RT 25 [40]. Die Autoren präsentieren Ergebnisse einer empirischen „Design of Experiments“ (DOE) Studie, in der sie den positiven Effekt hoher Luftvolumenströme und geringer Verkapselungsdicke der PCM-Module im Wärmetauscher betonen.

Die Fa. Bailey, Großbritannien, setzt in einem Pilotprojekt im hauseigenen Verwaltungsgebäude makroverkapseltes RT 25 als Kompaktspeicher in abgehängten Decken zur Pufferung von Spitzenlasten ein. Die konditionierte Abluft wird durch einen PCM-Wärmetauscher geführt, bevor sie als Fortluft das Gebäude verlässt. Die Dimensionierung wurde von der Fa. Rubitherm vorgenommen. Bis zum Zeitpunkt der Anfertigung dieser Arbeit wurden die Temperaturverläufe in den Räumen weder messtechnisch untersucht noch die Effizienz der Kompaktspeicher berechnet. Eine Weiterentwicklung mit kontrollierter Luftführung in der abgehängten Decke und eine Aufnahme dieses Systems in das Angebot des Bauunternehmens sind für die Zukunft geplant [41].

Scalat et al. (1996) [42] untersuchten Wandplatten, die mit organischen PCM getränkt waren. Das verwendete PCM wies einen Schmelzbereich von 16°C - 21°C auf, da die Anwendung sowohl zur Reduktion des Heizwärmebedarfs wie zum sommerlichen Wärmeschutz gedacht ist. Im Sommerfall wird von einer Raumluftkonditionierung ausgegangen. Der Fokus der Studie lag auf einer möglichen Nutzung von Off-peak-Elektrizität in den Nachtstunden, um das PCM zu laden

(Winterfall) bzw. zu entladen (Sommerfall). Als Dimensionierungsrichtlinie geben die Autoren eine Lade- bzw. Entladezeit des PCM von 7 h an.

Feustel et al. (1997) [43] veröffentlichten eine der umfangreichsten Studien zur Nutzung von PCM-Wandplatten für eine passive Kühlung von Wohnräumen. Hintergrund war die Erhöhung der thermischen Masse von Wohnhäusern, die aufgrund eines erhöhten Erdbebenrisikos in Leichtbauweise errichtet waren. Unter Annahme von kalifornischen Klimaverhältnissen, die eine hohe Temperaturspreizung von Tages- und Nachttemperaturen beinhalten, ist der Studie zufolge ein Verzicht auf eine Raumluftkonditionierung bei Verwendung von PCM-Platten dann möglich, wenn mittels erhöhter Nachtlüftung die Entladung des Latentwärmespeichers gewährleistet ist. Dünne plattenförmige Latentwärmespeicher werden für einen 24 h-Zyklus als geeignet betrachtet. Für längere Perioden wird die Erhöhung der Schichtdicke empfohlen.

Yanbing et al. (2003) [44] entwickelten ein System zur gezielten Kombination von Nachtlüftung und dem Einsatz von Latentwärmespeichern, die in Raumbegrenzungsflächen integriert sind. In der Nacht wird kühle Luft durch das PCM-Element geführt, um die Entladung zu gewährleisten. Während des Tages wird die Raumlufte durch das gekühlte PCM geführt, das als Wärmetauscher wirkt. In Testräumen in Peking wiesen sie nach, dass so Maximaltemperaturen um 3 K gesenkt werden können und die Dauer der Überhitzungszeit deutlich abnimmt.

Auch in Deutschland werden seit Ende der neunziger Jahre verstärkt Einsatzmöglichkeiten von Phasenübergangsmaterialien zum sommerlichen Wärmeschutz untersucht.

Am Bayerischen Zentrum für angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern) wurde in den vergangenen Jahren im Rahmen eines Verbundprojektes an der Entwicklung von im Bauwesen einsetzbaren PCM inkl. erstarrungsbeschleunigender Keimbildner sowie Verfahren zur Verkapselung von PCM gearbeitet. Weitere Projekte zu Phasenübergangsmaterialien wurden auf dem 2004 organisierten ZAE-Symposium „Wärme- und Kältespeicherung mit Phasenwechselmaterialien (PCM) – Materialien, Anwendungen, Einsatzgebiete“ vorgestellt [45].

Zusammen mit Industriepartnern (warema) setzt das ZAE die Idee von PCM in Sonnenschutz-Jalousien fort; im Gegensatz zu den frühen französischen Arbeiten allerdings im Hinblick auf den sommerlichen Wärmeschutz. Die Latentwärmespeicherung dient zur Phasenverschiebung der Maximaltemperaturen in Büroräumen und zur Reduktion der Strahlungsasymmetrie im Sommerfall. Eine erhöhte Nachtlüftung wird bei der Anwendung von PCM-Jalousien als günstig, jedoch nicht als notwendig beschrieben [46].

Bei der Entwicklung von Gipskartonplatten, die PCM enthalten, kommt die Fa. Knauf zu dem Schluss, dass eine Phasenübergangstemperatur von 28°C zu hoch ist. Messungen in einem Testobjekt ergeben eine maximale Reduktion der Lufttemperatur von 2 K und eine Reduktion der operativen Temperatur von 3 K [47].

Die Entwicklung eines mikroverkapselten Paraffin-Gemisches durch die Firma BASF brachte neue Möglichkeiten zur Anwendung von dezentralen Latentwärmespeichern in Räumen. Die Mikrokapseln können in organische Baustoffe gemischt werden und in konventionelle Bauprodukte eingebracht werden [48, 49].

Am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg wurden in zwei nach Süden orientierten Büros verschiedene PCM-haltige Baustoffe aufgebracht. In einem der Büros wurde ein Gipsputz mit 10 M.% PCM, im zweiten eine Spachtelmasse auf Dispersionsbasis mit 25 M.% PCM verwendet. Bei dem PCM handelt es sich um ein mikroverkapseltes Paraffin-Gemisch, das in den Innenputz bzw. die Spachtelmasse gemischt war. Die auf die Wände aufgetragene Schichtdicke betrug 15 mm für den Gipsputz und 6 mm für die Spachtelmasse. Messungen bei hohen Außentemperaturen zeigten, dass sich die Wände in den beiden Testräumen gegenüber Referenzmessungen ohne PCM im Temperaturbereich 24 bis 26°C erkennbar langsamer aufheizten. Die Auswirkungen waren allerdings gering, da die Büros freiliegende Betondecken mit einer ohnehin hohen Wärmekapazität besaßen [50].

Analog zum Neubau des Fraunhofer ISE wurde von dem zur BASF gehörigen Wohnungsbauunternehmen Luwoge GmbH die Idee des „3-Liter-Hauses in der Altbausanierung“ entwickelt. Dabei wurden an einem Altbau in Ludwigshafen im Zuge von Sanierungsmaßnahmen PCM-modifizierte Baustoffe verwendet. Aufgrund der Tatsache, dass es sich um ein massives Gebäude handelte, konnten keine bedeutsamen Änderungen hinsichtlich der Raum- und Wandtemperaturen registriert werden. Durch die guten Dämmeigenschaften des so genannten 3-Liter-Hauses traten zudem nur geringfügige Schwankungen der Innentemperaturen auf. Ein anderes Referenzobjekt der Firma BASF ist das hauseigene „Dienstleistungs- und Servicecenter“ in der Nähe des BASF-Werksgeländes. Hier wurde PCM (micronal®) in Form eines gipsgebundenen Latentwärmespeichers in einer Kühldecke mit Kapillarrohrmatten eingebracht [51].

Um die Auswirkungen PCM-haltiger Baustoffe in Gebäuden in Leichtbauweise zu simulieren, wurden am Fraunhofer ISE an einem Fassadenteststand zwei identische Testzellen eingerichtet. Diese besitzen eine typische Leichtbaukonstruktion aus Lattung und Gipskartonplatten und sind innen mit 14 cm PU-Schaum gedämmt. In einer der Zellen wurden 6 mm einer PCM-haltigen Spachtelmasse auf Dispersionsbasis mit 25 M.% eines mikroverkapselten Paraffins aufgetragen. Die zweite wurde für Referenzmessungen mit der gleichen Spachtelmasse ohne PCM ausgestattet. Der Schmelzbereich des verwendeten Paraffins betrug 24 bis 26°C, so zeigte sich erwartungsgemäß in dem mit PCM ausgestatteten Testraum ein stark verlangsamter Temperaturanstieg bis zum Erreichen von etwa 27°C. Erste Versuche wurden bei sonnigem Wetter ohne jegliche Verschattung durchgeführt, dabei konnte eine Abnahme des PCM-Kühleffekts in den ersten Tagen beobachtet werden. Versuche unter realen Bedingungen mit automatischer Verschattung und größeren Schichtdicken zeigten, dass durch den Einsatz des PCM deutlich niedrigere Temperaturen über einen längeren Zeitraum auftreten können [52].

Zusammenfassend zeigen die experimentellen Untersuchungen mit Phasenübergangsmaterialien, die plattenförmig an der raumseitigen Oberfläche der Innenwände angebracht werden, die Größenordnung der erzielbaren Temperaturreduktionen auf. Lufttemperaturen konnten um 1 - 5 K verringert werden; Oberflächentemperaturen werden stärker reduziert. Die verwendeten Schmelzpunkte variierten von 21°C bis 29°C und die Werte der spezifischen Latentwärme der benutzten PCM reichten von 20 kJ/kg bis 110 kJ/kg. Übliche Schichtdicken sind 1 - 5 cm. Unterkühlungseffekte (Erstarrungstemperatur geringer als Schmelztemperatur) werden bei anorganischen Salzhydraten erwähnt und stellen dort zusammen mit der Phasenseparation beim Schmelzen eines der Hauptprobleme dar. Bei den Untersuchungen mit PCM auf Paraffinbasis wird nicht von Unterkühlung berichtet.

Empfehlungen bezüglich der optimalen Schichtdicke werden nur sehr eingeschränkt gegeben. Die Wahl der optimalen Schmelztemperatur wird nur ansatzweise und nur im Hinblick auf konkrete Randbedingungen diskutiert. Die Notwendigkeit der Entladung des PCM wird in den meisten Arbeiten herausgestellt. Häufig wird als Ergebnis der messtechnischen Untersuchungen die Kombination von Latentwärmespeichern und erhöhter Nachtlüftung empfohlen. In Gebäuden, in denen die sensible Speichermasse hoch ist, nimmt die Effizienz des PCM ab, da die massiven Wände bzw. Decken bereits Wärme einspeichern. Der Einsatz von Phasenübergangsmaterialien ist demzufolge vor allem in Gebäuden mit geringer thermischer Masse sinnvoll.

2.6.2 Mathematische und numerische Modelle

Fischer (1985) [53] untersucht verschiedene numerische Verfahren in Hinblick auf Art des Phasenübergangs, Randbedingungen und örtliche Diskretisierung. Eine Konvektion der flüssigen Phase an der Phasengrenze wird ausgeschlossen. Die Arbeit dient zur Bestimmung von Auftau- und Gefriervorgängen bei Lebensmitteln und Erden. Beim Vergleich von Finite-Differenzen-Verfahren mit der analytischen Lösung ergeben sich hohe Übereinstimmungen. Bei engen Phasenübergangsbereichen und hohen Temperaturdifferenzen im PCM ergaben sich Probleme mit der Ortsdiskretisierung. Der Knotenabstand Δx darf nicht zu groß gewählt werden, um ein Überspringen des Phasenübergangs zu vermeiden. Bei ausreichend kleinen Ortsschritten bestimmt die Qualität der experimentell bestimmten thermischen Materialparameter die Abschätzung von Gefrier- und Auftauzeiten.

Radhakrishnah et al. (1992) [54] berechnen Erstarrungs- und Gefrierzeiten in PCM-Rohr-Wärmetauschern, wobei der Phasenübergang als klassischer Phasenübergang erster Ordnung behandelt wird. Auf Basis numerischer Parametervariationen stellen sie Korrelationen zwischen Erstarrungszeiten, Rohrdurchmessern und thermischen Materialkonstanten auf.

Egolf et al. (1994) [55] entwickeln ein mathematisches Modell, das den Phasenübergang in einem Temperaturbereich τ darstellt. Je kleiner τ gewählt wird, umso mehr nähert sich der Phasenübergang einem Übergang 1. Ordnung. Die numerische Berechnung der Erstarrungsdauer wird für immer kleinere Phasenübergangsbereiche auf seine Annäherung an die exakte analytische Lösung getestet.

Matsumoto et al. (2001) [56] stellen Gleichungen auf, die die Phasenumwandlung von in Baumaterialien enthaltenem Wasser beinhalten und setzen diese in einem Finite-Differenzen-Verfahren um. Im numerischen Modell werden die drei möglichen Aggregatzustände fest, flüssig und gasförmig berücksichtigt. Damit können Feuchtigkeits- und Frosteindringtiefen in Abhängigkeit von den Temperaturverhältnissen und im Zusammenspiel mit den Wärmetransportvorgängen berechnet werden.

Glück (2002) [57] untersucht Deckenkühl-Elemente mit aktivierten Latentwärmespeichern. Die Aktivierung erfolgt mit Hilfe eines wasserdurchflossenen Rohrsystems. Zur dreidimensionalen Modellierung wird auf die Bauteile inkl. Rohre ein kartesisches Koordinatensystem angewandt und die Wassertemperatur wird als konstant angenommen. Glück verwendet ein explizites Differenzenverfahren mit Zeitschrittweiten zwischen 1 s und 4 s, um den Stabilitätsanforderungen des dreidimensionalen Modells gerecht zu werden. Er empfiehlt für aktive Latentspeicherkomponenten eine niedrigere Phasenübergangstemperatur als für passiv genutzte PCM.

Pietzsch (2003) [58] stellt thermophysikalische Modelle für Latentwärmespeicher in der Kältetechnik vor. Bei den untersuchten PCM in Matrixstrukturen berücksichtigt er Dichteunterschiede und die Mischung der Phasen während der Umwandlung. Wesentlicher Bestandteil seines Modells (zur Berechnung von PCM-Elementen als Rohrummantelung) ist die temperaturgesteuerte Umwandlungskinetik. Um den Speicherladezustand des Latentwärmespeichers zu erfassen, nutzt er eine geschichtsabhängige Entwicklungsvariable.

Die numerischen Modelle zur Darstellung des Phasenübergangs basieren meist auf Finite-Differenzen-Verfahren. Die Ansätze unterscheiden sich voneinander maßgeblich durch die Beschreibung des Phasenübergangs. Lineare und hyperbolische Funktionen zur Darstellung des Enthalpieverlaufs eines kontinuierlichen Phasenübergangs werden häufig verwendet. In den Fällen, in denen das Modell einem Phasenübergang erster Ordnung angenähert ist, ergibt der Vergleich der analytischen Lösung mit den numerischen Ergebnissen eine hohe Übereinstimmung. Für Modelle mit Phasenübergang in einem breiteren Temperaturbereich ist dieser Vergleich nicht möglich, da keine analytische Lösung existiert. Dort, wo numerische Berechnungen mit experimentellen Messergebnissen verglichen wurden, betonen die Autoren die Bedeutung einer exakten Bestimmung der relevanten Materialparameter.

In den meisten Fällen wird die Wärmeleitfähigkeit der Materialien als konstant im jeweiligen Temperaturbereich betrachtet. Der Unterkühlungseffekt wird im numerischen Modell nicht behandelt. Explizite Lösungsverfahren werden häufig angewandt, wobei von den Autoren die Anforderungen an geringe Zeitschrittweiten und eine kleinmaschige örtliche Diskretisierung betont werden. Implizite Verfahren werden da verwendet, wo die Randbedingungen komplexer sind und in Form von Messdatenreihen vorliegen. Parametervariationen unter diversen Randbedingungen werden nur begrenzt durchgeführt. Häufig beschränkt sich die Betrachtung auf Erstarrungs- und Schmelzdauer des jeweiligen Phasenübergangsmaterials in einer bestimmten Geometrie.

2.6.3 Gebäudesimulationen

Gebäudesimulationen wurden für einzelne Problemstellungen durchgeführt. Feustel et al. (1997) [43] nutzen das am Laurence Berkeley National Laboratory entwickelte Programm RADCOOL, um Wandplatten zu simulieren, die bis zu 30 % PCM-getränkt waren. Bei Werten der spezifischen Latentwärme von bis zu 58 kJ/kg erzielten sie Temperaturreduktionen bis zu 4 K bei Verwendung eines PCM mit einer Phasenübergangstemperatur von 25°C unter kalifornischen Klimaverhältnissen.

Jokisalo et al. (1999) [59] berechneten die thermischen Verhältnisse in einem Büroraum mit dem Gebäudesimulationsprogramm TRNSYS, um die zur Abdeckung der Kühllast notwendige Masse eines theoretischen PCM zu bestimmen. Dazu entwickelten sie an der Universität von Helsinki einen TRNSYS-Typ, der den Latentwärmespeichervorgang modellieren kann. Mit einem optimierten PCM-Schmelzpunkt berechneten sie eine Spitzentemperaturreduktion von 2.8 K und empfehlen für das Klima von Helsinki eine Phasenübergangstemperatur von 23°C.

Heim et al. [60, 61] (2004) entwickelten ein erstes PCM-Modul für das Open-Source-Gebäudesimulationsprogramm ESP-r. Sie berechnen nur äußerst geringe Temperaturreduktionen < 1 K bei Annahme einer 1.2 cm dicken PCM-Platte mit einer spezifischen Latentwärme von 45 kJ/kg an allen Innenwänden und Decke. In der Zusammenfassung betonen sie die Notwendigkeit einer zukünftigen experimentellen Validierung und Weiterentwicklung des Moduls.

Schossig et al. (2003) nutzten ebenso das Gebäudesimulationsprogramm ESP-r zur Abschätzung des Temperaturreduktionspotentials von PCM. In einem ersten Ansatz unterteilten sie den kontinuierlichen Phasenübergang eines PCM-Putzes in drei lineare Abschnitte [52]. Die berechnete Temperaturreduktion beträgt 2 K für die Lufttemperatur in einem Raum mit PCM und 3 K für die Oberfläche des Putzes.

Ein kommerzielles Gebäudesimulationsprogramm, das ein Modul zur Berechnung von Phasenübergangsmaterialien enthält, ist nach Kenntnis der Autorin zum Zeitpunkt der Anfertigung dieser Arbeit nicht verfügbar. Modular aufgebaute Open-Source Programme wie die drei oben genannten, sind geeignet, dem jeweiligen Hauptprogramm eine Routine zur numerischen Berechnung der Wärmetransportvorgänge in PCM hinzuzufügen. Für die genannten PCM-Module liegt keine umfassende dokumentierte Validierung der numerisch berechneten Ergebnisse im Vergleich mit experimentell bestimmten Daten vor. Teilweise kann die Validierung über eine Plausibilitätsbetrachtung und im Vergleich mit anderen, experimentellen Forschungsarbeiten (s. Kap. 2.6.1) als gegeben betrachtet werden.

2.6.4 Vorarbeiten des Teilprojekts C5 des Sonderforschungsbereiches (SFB) 524 an der Bauhaus-Universität Weimar

Das Teilprojekt C5 wurde von der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) von Juli 2002 bis Dezember 2005 gefördert. Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches „Werkstoffe und Konstruktionen für die Revitalisierung von Bauwerken“ (SFB 524) wurden Phasenübergangsmaterialien zur Verbesserung des sommerlichen Wärmeschutzes in Revitalisierungsobjekten untersucht.

Vorarbeiten zum Thema waren das an der Bauhaus-Universität Weimar am Lehrstuhl Bauphysik in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl Angewandte Mathematik entwickelte Minimalmodell, das zur Abschätzung des Potentials von Phasenübergangsmaterialien diente. Es basiert auf einem System von Differentialgleichungen erster Ordnung, das für periodische Randbedingungen abschnittsweise analytische Lösungen aufweist. Kornadt et al. (2002) [62] berechnen Temperaturverläufe in einem vereinfacht dargestellten Raum mit und ohne PCM unter Berücksichtigung von erhöhter Nachtlüftung. Sie erhalten im Falle einer mehrtägigen Hitzeperiode Temperaturreduktionen von bis zu 6 K. Für nicht periodische Randbedingungen wurde das Minimalmodell numerisch als Maple-Programm umgesetzt und im Laufe der Förderperiode des Sonderforschungsbereiches weiterentwickelt, so dass ein Vergleich der berechneten Temperaturverläufe mit Messdaten durchgeführt werden konnte [63, 64].

Da die Vereinfachungen des Minimalmodells (Reduktion des Temperaturprofils im PCM auf eine einzige uniforme Temperatur, stationärer Wärmedurchgangskoeffizient) zu deutlichen Abweichungen von der Realität führen, wurde im Laufe des Teilprojekts von der Verfasserin, basierend auf den in Kap. 2.6.3 genannten Vorarbeiten von Heim [60, 61], ein numerisches Modell in das Gebäudesimulationsprogramm ESP-r implementiert [65].

3 Materialien mit Phasenübergang

3.1 Grundlagen der Wärmespeicherung

Wärme lässt sich physikalisch auf zwei Arten in einem Festkörper speichern: Sensibel und latent.

3.1.1 Sensible Wärmespeicherung

Erhöht sich bei Zufuhr von Wärme die Temperatur des Speichermaterials, spricht man von fühlbarer oder sensibler Wärmespeicherung. Die messbare Temperaturerhöhung verhält sich proportional zur im Material gespeicherten Wärme. Der Proportionalitätsfaktor ist die spezifische Wärmekapazität.

$$dQ = m \cdot c_p \cdot d\theta \quad [3-1]$$

Die spezifische Wärmekapazität c_p gibt, bei konstantem Druck, diejenige Wärmemenge Q an, die nötig ist, um 1 kg eines Stoffes um 1 K zu erwärmen. Bei einer Abkühlung des Stoffes um 1 K wird die entsprechende Wärmemenge frei. Die Abhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität von der Temperatur ist bei den meisten am Bau eingesetzten Materialien (ohne Phasenübergang) und unter den üblicherweise vorherrschenden Temperaturverhältnissen gering. Die sensibel gespeicherte Wärmemenge steigt daher annähernd linear mit der Temperaturdifferenz an (s. Abb. 3-1).

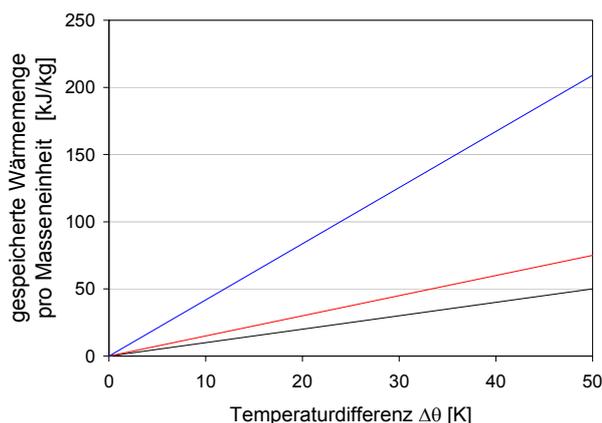


Abb. 3-1: *Sensible Wärmespeicherung ohne Phasenübergang*
Blau: Wasser, $c = 4.18 \text{ kJ/kgK}$
Schwarz: allgemein anorg. Baustoffe, $c = 1.0 \text{ kJ/kgK}$
Rot: PCM-Putz, $c = 1.15 \text{ kJ/kgK}$

3.1.2 Latente Wärmespeicherung beim Phasenübergang fest - flüssig

Phasenübergänge lassen sich unterscheiden in Phasenumwandlungen erster Art, Phasenumwandlungen zweiter Art und kontinuierliche Phasenumwandlungen. Landau [66] führt so genannte Ordnungsparameter als unabhängige Zustandsvariablen ein. Danach lassen sich die Phasenübergänge wie folgt definieren [67]:

Phasenübergang 1. Art: Der Ordnungsparameter ändert sich am Umwandlungspunkt sprunghaft, ist also unstetig.

Phasenübergang 2. Art: Der Ordnungsparameter ändert sich am Umwandlungspunkt stetig. Die 1. Ableitung erfährt einen Sprung.

Kontinuierliche Phasenumwandlungen: Der Ordnungsparameter ändert sich stetig über einen gewissen Temperaturbereich. Die Ableitungen erfahren keine Sprünge.

Diese Einteilung kann am Beispiel der Entropie s verdeutlicht werden (Abb. 3-2):

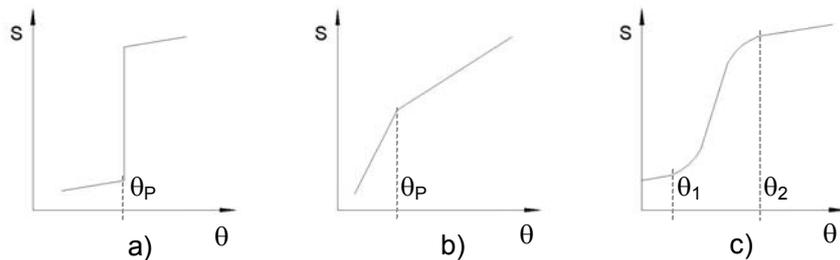


Abb. 3-2 a - c: 3-2a: Phasenübergang erster Art; 3-2b: Phasenübergang zweiter Art, 3-2c: kontinuierlicher Phasenübergang

Während beim Phasenübergang zweiter Art die Entropieänderung $\partial Q/T$ am Phasenübergangspunkt θ_P null ist, wird beim Phasenübergang erster Art Energie in Form von latenter (lat.: versteckter) Wärme umgesetzt. Latente Wärmespeicherung tritt beim Übergang zwischen den Aggregatzuständen (fest \leftrightarrow flüssig, flüssig \leftrightarrow gasförmig, fest \leftrightarrow gasförmig) auf.

Änderungen des Aggregatzustandes sind im Falle reiner Substanzen Phasenumwandlungen erster Art, d.h. der Phasenübergang findet an einer diskreten Phasenübergangstemperatur θ_P statt. Im Falle von PCM-Gemischen mit unterschiedlichen Phasenübergangstemperaturen „verschmiert“ der Phasenübergang zu einem kontinuierlichen bzw. quasikontinuierlichen Prozess innerhalb eines Temperaturbereiches $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$.

Für den Einsatz zur passiven Raumklimaverbesserung eignen sich Materialien, die einen Phasenübergang vom festen zum flüssigen Aggregatzustand durchlaufen, da dieser nur eine relativ geringe Volumenänderung des Materials zur Folge hat. Bei den Übergängen flüssig \leftrightarrow gasförmig und fest \leftrightarrow gasförmig treten erhebliche Druck- und Volumenänderungen auf, die stabile und großvolumige Gasspeicher erforderlich machen [68].

Bei einem fest \leftrightarrow flüssigen Phasenübergang erster Art beginnt die Phasenumwandlung bei Erreichen der Phasenübergangstemperatur. Es erfolgt bei weiterer Wärmezufuhr so lange keine Temperaturerhöhung des Materials, bis das Material vollständig geschmolzen ist. Erst dann steigt die Temperatur gemäß Gl. 3-1 weiter an. Dieser Vorgang ist reversibel, d. h. beim Abkühlen erstarrt das Material und auf dem Temperaturniveau des Phasenübergangs wird die vorher gespeicherte Wärmemenge abgegeben. Diese Latentwärme entspricht der Schmelz- bzw. Kristallisationswärme des Stoffes. Bei kontinuierlichen fest \leftrightarrow flüssigen Phasenübergängen wird die Latentwärme im Temperaturbereich $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$ umgesetzt.

Ein Phasenübergangsmaterial wirkt unterhalb und oberhalb der Phasenübergangstemperatur als sensibler Wärmespeicher, d.h. die zugeführte Energie bewirkt eine Erhöhung der kinetischen Energie der Moleküle oder Atome des Stoffes und damit eine Temperaturerhöhung. Bei Erreichen der Phasenübergangstemperatur wird Energie benötigt, um die Moleküle von der festen in die flüssige Phase zu überführen, d.h. Festkörperbindungen aufzubrechen. Dadurch wirkt das Phasenübergangsmaterial als Latentwärmespeicher.

Sensible und latente Wärmespeichervorgänge lassen sich als Enthalpieänderung dH eines Stoffes beschreiben. Die Definition der Enthalpie erfolgt aus der Erweiterung des 1. Hauptsatzes der Thermodynamik.

$$dQ = dU + pdV \quad [3-2]$$

$$H = U + pV \quad [3-3]$$

Für $p = \text{konst.}$ gilt: $dQ = dH \quad [3-4]$

Als Ausgangsgleichung zur in dieser Arbeit gewählten Beschreibung von Vorgängen in Körpern, die eine Phasenumwandlung in einem Temperaturbereich erfahren, dient die allgemeine Energiebilanzgleichung. Die zeitliche Änderung der Energiedichte $\rho \cdot u$ [J/m^3] eines Volumenelementes ist durch einen Energiefluss in das Volumenelement hinein bzw. aus ihm heraus und damit durch die räumliche Änderung der Energieflußdichte j [J/sm^2] gegeben [69]. Dabei wird vorausgesetzt, dass sich keine Energiequellen oder -senken im betrachteten Volumenelement befinden. Eindimensional betrachtet kann diese Gleichung wie folgt geschrieben werden, wobei u die spezifische Energie [J/kg] des Körpers darstellt:

$$\frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial t} = -\frac{\partial j}{\partial x} \quad [3-5]$$

Dabei kann die Energieflußdichte als Wärmestromdichte geschrieben werden:

$$j = -\lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad [3-6]$$

Falls die Rohdichte des Materials als konstant angenommen werden kann, erhält man aus Gl. 3-5 die folgende Formulierung:

$$\rho \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad \text{mit } \rho = \text{konst.} \quad [3-7]$$

Die zeitliche Änderung der spezifischen Energie u entspricht der Wärmeenergie, die während der Dauer des Phasenübergangs als spezifische⁵ und latente Wärme in dem Volumenelement umgesetzt wird.

Die Erweiterung von $\partial u / \partial t$ führt zu:

$$\rho \cdot \frac{\partial u}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad [3-8]$$

⁵ Die Ableitung der spezifischen inneren Energie nach der Zeit, $\partial u / \partial t$ bei konstantem Volumen wird als c_v bezeichnet. Da bei den betrachteten PCM mit fest \leftrightarrow flüssigem Phasenübergang die Volumenänderung sehr gering ist, ist auch die Differenz zwischen c_v und c_p klein. Daher wird im Folgenden der Unterschied zwischen c_v und c_p nicht weiter behandelt, sondern es wird allgemein von c als Wärmekapazität gesprochen.

Der Term $\partial u / \partial \theta$ entspricht einer Wärmekapazität, die sowohl die sensible als auch die latente Wärmespeicherung beinhaltet.

$$\partial u / \partial \theta = c(\theta) \quad [3-9]$$

Damit ergibt sich die Gleichung für Wärmetransportvorgänge in einem Phasenübergangsmaterial wie folgt:

$$\rho \cdot c(\theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad [3-10]$$

Die Funktion $c(\theta)$ beinhaltet im Bereich oberhalb und unterhalb des Phasenübergangs die sensible Wärmespeicherung und im Phasenübergangsbereich die sensible und latente Wärmespeicherung $c_{\text{latent}}(\theta)$:

$$\theta < \theta_1: \quad c(\theta) = c_{\text{solid}} \quad [3-11a]$$

$$\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2: \quad c(\theta) = c_{\text{solid}} + c_{\text{latent}}(\theta) \quad [3-11b]$$

$$\theta > \theta_2: \quad c(\theta) = c_{\text{liquid}} \quad [3-11c]$$

Findet im Material kein Phasenübergang statt und unter der Annahme $\lambda = \text{konst.}$ und $c_{\text{solid}} = c_{\text{liquid}} = c$ ergibt sich die Fourier'sche Wärmeleitungsgleichung für den eindimensionalen Fall:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad [3-12]$$

3.1.3 Unterkühlung

Bei Phasenübergängen erster Art kann die Schmelztemperatur von der Erstarrungstemperatur abweichen. Bei kontinuierlichen Phasenübergängen kann ebenso der Beginn des Erstarrens vom Ende des Schmelzens abweichen. In diesen Fällen kühlt die flüssige Phase unter den Schmelzpunkt ab, ohne dass eine Kristallisation eintritt. Diesen Effekt bezeichnet man als Unterkühlung. Abb. 3-3 zeigt die Temperatur eines unterkühlten PCM mit Phasenübergang erster Art während des Schmelz- und des Erstarrungsprozesses. Der Bereich des unterkühlten flüssigen PCM wird auch als Ostwald-Miers-Bereich bezeichnet und beschreibt die Differenz zwischen Schmelzpunkt und Kristallisationspunkt.

Grundsätzlich sind für den Abkühlungsprozess Kristallisationskeime notwendig. Erreichen diese eine bestimmte Größe, können sich Kristalle daraus bilden. Die Geschwindigkeit der Keim- und Kristallbildung hängt vom Material selbst und von äußeren Faktoren, wie z.B. der Abkühlgeschwindigkeit ab. Thermodynamisch gesehen stellt das unterkühlte PCM einen metastabilen Zustand im System dar [70]. Die Unterkühlung des Materials tritt meist als unerwünschter Effekt auf. Daher wird versucht, Unterkühlungseffekte mittels Keimbildner (Fremdkeime aus Verbindungen mit ähnlicher Kristallstruktur wie das eigentliche PCM) zu reduzieren oder ganz zu vermeiden.

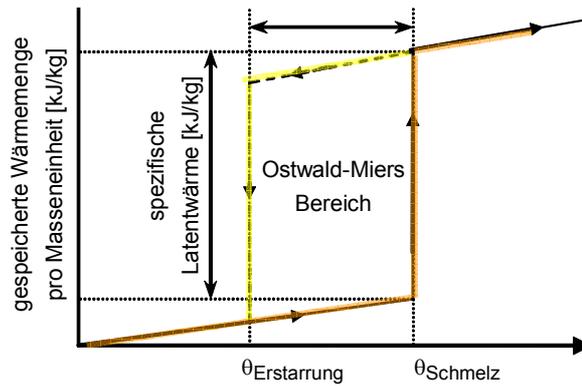


Abb. 3-3: Latente Wärmespeicherung (Phasenübergang erster Art) schematisch mit Unterkühlung

3.2 PCM für den Einsatz in Gebäuden

3.2.1 Überblick über gängige PCM-Gruppen

Grundsätzlich gliedert man PCM in organische und anorganische Stoffe mit ihren jeweiligen Eutektika⁶. Welches PCM eingesetzt wird, hängt maßgeblich von der für die Anwendung geforderten Phasenübergangstemperatur ab [71, 72, 73].

Paraffine für $0^{\circ}\text{C} < \theta < 150^{\circ}\text{C}$: Paraffine sind Kohlenwasserstoffe, die der Gruppe der Alkane ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$) zugeordnet werden. Paraffine werden aus Erdöl produziert oder entstehen als Nebenprodukt bei der Schmierölherstellung. Man unterscheidet zwischen Normal-Paraffinen (einfache, lang gestreckte Kettenmoleküle) und Iso-Paraffinen (verzweigte Kettenmoleküle). In der Wärmetechnik kommen hauptsächlich die Normalparaffine aufgrund ihrer günstigeren Kristallsymmetrie und thermischen Eigenschaften zur Anwendung [74].

Salzhydrate und deren eutektische Mischungen für $0^{\circ}\text{C} < \theta < 130^{\circ}\text{C}$: Salzhydrate entstehen durch Kristallisation aus wässriger Salzlösung, dabei werden Wassermoleküle in feste Salzkristalle eingelagert, das so genannte Kristallwasser. Die Wärmeleitfähigkeit von Salzhydraten variiert deutlich zwischen fester und flüssiger Phase und ist größer als bei organischen Stoffen. Reine Salzhydrate verfügen über einen relativ engen Schmelzbereich, sind nicht brennbar und weisen deutlich niedrigere Materialkosten als vergleichbare PCM auf. Nachteilig wirken sich bei Salzhydraten die Phasenseparation, die Umweltgefährdung, ihre Giftigkeit und ihre Korrosivität gegenüber Metallen aus. Ein weiterer Nachteil ist die Tendenz zur Unterkühlung, die bei allen einsetzbaren Hydraten auftritt und von einer geringen Kristallisationsrate begleitet wird. Auch die Langzeitstabilität wird durch den enormen Dampfdruck des enthaltenen Wassers beeinträchtigt, so dass alle Behälter wasserdampfdicht sein müssen, um eine Verdunstung des Wassers zu verhindern [68].

⁶ Als Eutektikum wird eine Mischung (Zweistoff-System) bezeichnet, die wie ein einheitlicher Stoff bei einer bestimmten Temperatur erstarrt. Diese Temperatur liegt meist unter dem Erstarrungspunkt des Stoffes mit dem niedrigsten Erstarrungspunkt.

3.2.2 Anforderungen an PCM

Die maßgeblichen Anforderungen für PCM insbesondere beim Einsatz in Gebäuden sind in Tab. 3-1 aufgelistet. Die für den passiven Einsatz zur Erhöhung der thermischen Masse am besten geeignete Schmelztemperatur wird im Laufe der numerischen Untersuchung behandelt (Kap. 5 und Kap. 8). Für die meisten Räume ist ein Schmelzbereich von 24 - 26°C ideal. Dadurch wird die Auswahl der möglichen PCM stark eingeschränkt. Eine möglichst hohe spezifische Latentwärme und insbesondere eine hohe Speicherdichte ist unbedingt anzustreben. Die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit ist in manchen Fällen zu empfehlen. Für die untersuchten Anwendungen mit geringen PCM-Schichtdicken erweist sich eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit als nicht vordringlich. Bei Schichtdicken über 3 cm sollte jedoch unbedingt auf eine möglichst gute Wärmeleitung zu den tieferen Schichten geachtet werden.

Die Reproduzierbarkeit des Phasenübergangs und die Langzeitstabilität ist notwendig, um die langfristige Effizienz eines PCM abschätzen zu können. Probleme mit inkongruentem Schmelzen und Unterkühlung treten insbesondere bei Salzhydraten auf. Beim Einbringen von PCM mittels Makroelementen muss auf Expansionsmöglichkeiten beim Schmelzen und auf eventuelle Druckunterschiede geachtet werden. Gleichzeitig ist die Luftdichtigkeit der PCM-Container bei Salzhydraten sehr wichtig.

Physikalisch	Technisch	Wirtschaftlich/Ökologisch
geeignete Temperatur des Phasenübergangs, geringe Unterkühlung	geringer Dampfdruck	geringer Preis
hohe Schmelzenthalpie	geringe Volumenänderung und Dichteunterschiede zwischen fester und flüssiger Phase	toxikologische Unbedenklichkeit
hohe Speicherdichte (I^*_{ρ})	chemische und physikalische Stabilität	leichte Verarbeitung
hohe Wärmekapazität	Brandschutz / geringe Brennbarkeit, Entflammbarkeit	Umweltverträglichkeit
möglichst hohe Wärmeleitfähigkeit	Verkapselungstechnik oder Tränken möglich, geringe Korrosivität	Möglichkeit zum Recycling
reproduzierbarer Phasenübergang, kongruentes Schmelzen und Erstarren	Zyklusstabilität /Langzeitstabilität	möglichst langer Erneuerungszyklus

Tab. 3-1: Anforderungen an Phasenübergangsmaterialien

Der Brandschutz ist im Bauwesen von besonderer Bedeutung. Während die meisten Salzhydrate aufgrund des eingeschlossenen Kristallwassers nicht brennbar sind, ist Paraffin, das als Grundstoff für Kerzenwachs verwendet wird, in hohem Maße brennbar.

3.3 Mikroverkapselter PCM-Putz

Um die Anforderungen an den Einsatz von PCM im Gebäude zu erfüllen, wurde in den letzten Jahren an verschiedenen Verkapselungstechniken geforscht. Verschiedene deutsche und internationale Firmen arbeiten an der Einbettung von mikroverkapseltem PCM in Spachtelmassen, Gipsputzen und Gipskartonplatten.

3.3.1 Paraffine

Paraffine sind der Gruppe der Alkane (C_nH_{2n+2}) zugeordnet. Ihre spezifische Latentwärme und ihre Schmelztemperatur hängen von der Anzahl der Kohlenstoffmoleküle ab. Für den Einsatz zur Verbesserung des Raumklimas eignen sich hauptsächlich Heptadekan und Oktadekan (s. Tab. 3-2). Geradzahlige Paraffine (C20 - 32) und ungeradzahlige (ab C7) besitzen zwei Phasenübergänge. Ihre Gitterstruktur verändert sich bei Temperaturen unterhalb des Schmelzpunktes deutlich (fest \leftrightarrow fester Phasenübergang). Erhältliche PCM auf Paraffin-Basis sind i. A. Mischungen, die durch Überlagerung unterschiedlicher Schmelzpunkte und fest \leftrightarrow fester Phasenübergänge einen breiten Schmelzbereich besitzen. Das Schmelzverhalten der PCM muss analysiert werden, um den Temperaturbereich des Phasenübergangs angeben zu können.

	Anzahl der Kohlenstoffatome	Peak-Temperatur des Phasenübergangsbereichs [°C]	Spezifische Latentwärme [kJ/kg]
Tetradekan	14	5.8	227
Pentadekan	15	9.9	206
Hexadekan	16	18.1	236
Heptadekan	17	21.9	214
Oktadekan	18	28.1	244
Nonadekan	19	32.0	222

Tab. 3-2: Schmelzpunkte und Latentwärme unterschiedlicher Alkane

Paraffine eignen sich aufgrund ihrer Reaktions- und toxischen Trägheit besonders für den Einsatz in Gebäuden. Sie sind langzeitstabil, beständig gegenüber Säuren und Basen, ungiftig, nicht umweltgefährdend und oxidieren erst ab Temperaturen von 80 - 100°C.

Da Paraffine zu den Einkomponentensystemen gehören, separieren sie nicht und erfüllen somit eine der wichtigsten Forderungen nach Zyklenstabilität. Paraffine zeigen keine oder nur geringe Unterkühlung. Die Erstarrungsrate ist im Allgemeinen ausreichend, so dass keine Additive benötigt werden.

Die geringe Wärmeleitfähigkeit (0.15 - 0.25 W/mK) kann bei größeren Materialstärken die Aktivierung tieferer PCM-Schichten behindern. Die Rohdichte von Paraffinen ist mit 700 - 900 kg/m³ relativ gering. Die spezifische Wärmekapazität liegt im Temperaturbereich oberhalb von 0°C bei ca. 2.1 kJ/kgK.

3.3.2 Mikroverkapselung

Zhang et al. (2004) [75] beschreiben den Vorgang der Mikroverkapselung von n-Oktadekan. Eine Emulsion aus n-Octadekan, destilliertem Wasser und einem Emulgator wird hergestellt. Gleichzeitig wird ein so genanntes Präpolymer aus Melamin, Formaldehyd und destilliertem Wasser bei 70°C hergestellt. Die Emulsion wird durch Zusätze auf einen pH-Wert von 5, das Präpolymer auf einen pH-Wert von 8 justiert. Das Präpolymer wird tropfenweise in die Emulsion eingerührt und 2 h lang zentrifugiert. Anschließend wird der pH-Wert auf 9 erhöht, womit die Polymerisation beendet wird. Die Emulsion wird dann auf 25°C gekühlt und gefiltert. Es bleiben die mit n-Oktadekan gefüllten Mikrokapseln übrig, die gewaschen und bei 100°C getrocknet werden.

Auch von der BASF wurde ein erfolgreiches Verfahren für die Mikroverkapselung von auf Paraffin basierenden PCM entwickelt. Die von der BASF hergestellten Mikrokapseln mit Paraffingemisch werden ebenso durch Zusatz von wasserlöslichem Melamin in eine Öl-in-Wasser Emulsion hergestellt. Die Mikrokapseln tolerieren die Volumenänderung, die beim Phasenübergang fest ↔ flüssig entsteht [46]. Die genaue Zusammensetzung des verwendeten PCM wird vom Hersteller nicht angegeben.

Die mit PCM gefüllten Mikrokapseln werden in einen Innenputz der Fa. Maxit gemischt und inzwischen als fertiger Maschinen-Putz unter der Bezeichnung maxit clima[®] vertrieben. Der untersuchte PCM-Putz hat ein Prüfzeugnis über die Brandstoffklasse B2 [76].

An der Bauhaus-Universität Weimar wurden Rasterelektronenmikroskop (REM)-Aufnahmen dieses PCM-Putzes durchgeführt. Abb. 3-4 und 3-5 zeigen die PCM-Mikrokapseln in der Matrixstruktur eines ausgehärteten Gipsputzes eingebettet. Der Durchmesser der Mikrokapseln beträgt ca. 5 µm.

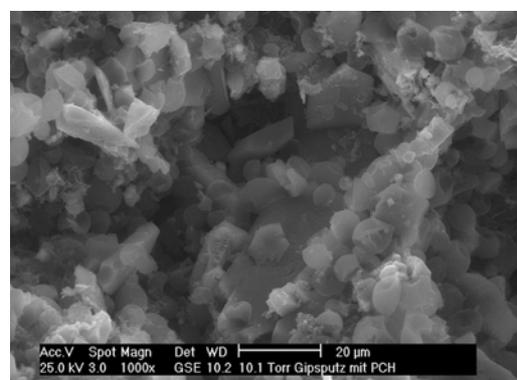
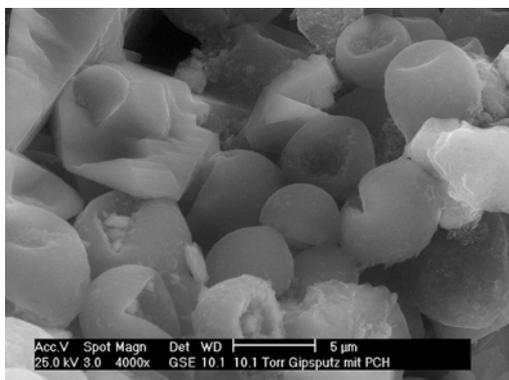


Abb. 3-4 und 3-5: PCM-Mikrokapseln im Gipsputz,
REM-Aufnahmen Finger-Institut, Bauhaus-Universität Weimar

3.3.3 Temperaturleitfähigkeit im festen und flüssigen Zustand

Die Temperaturleitfähigkeit eines Stoffes ist die bestimmende Größe des stationären Wärmetransports und entscheidend für die Temperaturverteilung im Bauteil. Die Annahme einer konstanten Temperaturleitfähigkeit ist dann zulässig, wenn Wärmeleitfähigkeit, Rohdichte und spezifische Wärmekapazität im betrachteten Temperaturbereich nur in geringem Maße von der Temperatur abhängen. Diese Annahme kann für den betrachteten PCM-Putz nur für den rein festen und den rein flüssigen Bereich getroffen werden.

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad \text{für } \lambda, \rho, c_p = \text{konst.} \quad [3-13]$$

Die Temperaturleitfähigkeit des PCM-Putzes wurde mit einer Laser-Flash-Apparatur NETZSCH-LFA 427 an einer Probe des abgebundenen Putzes durchgeführt. Beim Laser-Flash-Verfahren werden sowohl Heizquelle (Laser) wie auch die Temperatursensoren berührungsfrei angebracht. Der Temperaturanstieg wird auf der Rückseite der Probe mit einem Infrarotdetektor gemessen.

Für die numerische Betrachtung der Wärmeleitung an den Rändern eines homogenen Bauteils ist die Kenntnis der die Temperaturleitfähigkeit bestimmenden Einzelgrößen λ , ρ , c_p notwendig. Es wurden daher die Rohdichte und die spezifische Wärmekapazität des Putzes im festen und flüssigen Zustand bestimmt. Die Wärmeleitfähigkeit wurde aus den gemessenen Größen a , ρ und c_p gemäß Gl. 3-12 berechnet.

Die spezifische Wärmekapazität c_p im rein festen und rein flüssigen Zustand wurde mit einem Differential Scanning Calorimeter (DSC) an der Universität Jena bestimmt. In beiden Bereichen ist ein linearer Anstieg der spezifischen Wärmekapazität mit der Temperatur festzustellen. Die Regressionsgeraden für den festen und flüssigen Zustand lauten:

Fest: $c_p = 1.104 \text{ [kJ/kgK]} + 5.47 \cdot 10^{-3} \text{ kJ/kgK}^2 \cdot \theta \text{ [}^\circ\text{C]}$ Determinationskoeffizient $R^2 = 0.99$
 Flüssig: $c_p = 1.070 \text{ [kJ/kgK]} + 1.49 \cdot 10^{-3} \text{ kJ/kgK}^2 \cdot \theta \text{ [}^\circ\text{C]}$ Determinationskoeffizient $R^2 = 0.95$

Da sowohl für den festen wie auch für den flüssigen Zustand die Steigung der Geraden 0.01 kJ/kgK^2 nicht überschreitet und die Temperaturspanne im Innenraum begrenzt ist, kann als Vereinfachung ein einheitlicher Wert von ca. 1150 J/kg für das feste und das flüssige PCM angenommen werden.

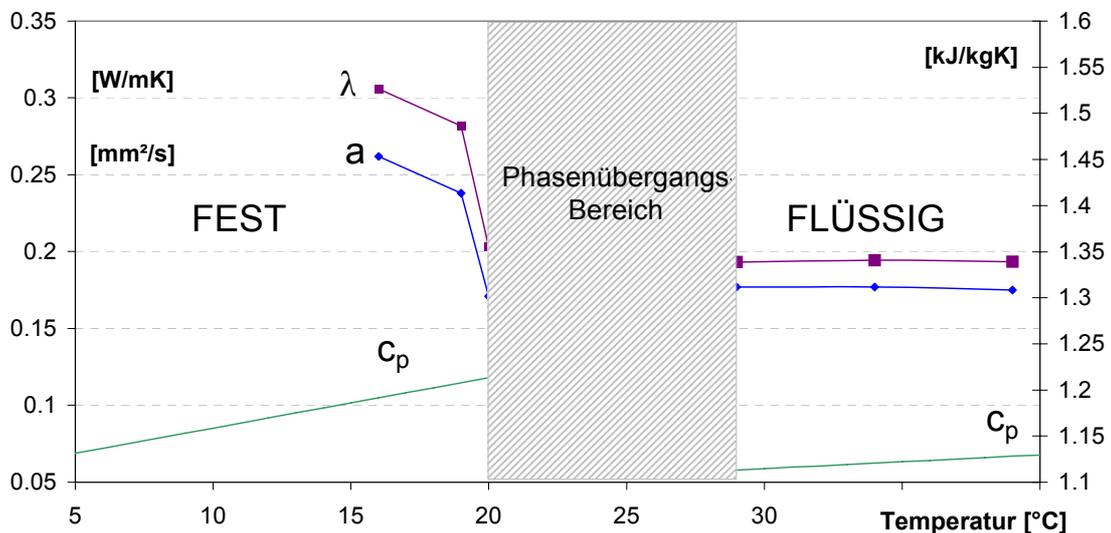


Abb. 3-6: Thermische Größen des untersuchten PCM-Putzes in fester und flüssiger Phase

Die Rohdichte des PCM-Putzes wurde im festen Zustand bestimmt. Die Mikroverkapselungstechnik ermöglicht den Ausgleich der Volumenänderung der in der Gipsmatrix eingebetteten Mikrokapseln, so dass nicht von einem signifikanten Unterschied zwischen festem und flüssigem Zustand ausgegangen werden kann. Abb. 3-6 stellt grafisch die gemessenen Werte für die spezifische Wärmekapazität und die Temperaturleitfähigkeit und die berechneten Werte für die Wärmeleitfähigkeit dar. (Messberichte über die Temperaturleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität s. Anhang 1)

3.3.4 DSC-Messungen des PCM-Putzes

Da die Mikrokapseln des untersuchten Latentwärmespeicherputzes keinen Reinstoff, sondern ein Stoffgemisch beinhalten, findet der Phasenübergang des PCM-Putzes nicht bei einer scharfen Schmelztemperatur, sondern in einem Temperaturbereich $[\theta_1; \theta_2]$ statt (s. a. Kap. 3.1.2).

Zur Bestimmung dieser Temperaturen θ_1 und θ_2 und der während des Phasenübergangs umgesetzten Latentwärmemenge wurden Messungen mit einem Differential-Scanning-Calorimeter (DSC) durchgeführt. Es wurden verschiedene Probekörper gemessen, die dem hydratisierten PCM-Putz zu unterschiedlichen Zeitpunkten während der Laufzeit dieser Arbeit entnommen wurden. Die durchgeführten DSC-Messungen fanden im Zeitraum vom 28.01.2003 bis 1.11.2004 statt. 16 Messkurven (Anhang 2) können daraus als relevant betrachtet werden und dienen als Grundlage für die Bestimmung der thermischen Parameter.

Bei der Messung mit einem Differential Scanning Calorimeter (DSC) wird der Probekörper mit einem geregelten Wärmestrom \dot{Q} bei konstantem Druck so beaufschlagt, dass sich seine Temperatur mit einer konstanten Rate r [K/s] beim Schmelzvorgang erhöht bzw. beim Erstarrungsprozess verringert. Aus der zugeführten Wärmemenge lässt sich die Enthalpieänderung im Stoff abhängig von der Temperaturdifferenz bestimmen.

Die spezifische Latentwärme wird aus der Enthalpieänderung zwischen θ_1 und θ^* ermittelt. θ_1 ist die Temperatur, bei der der DSC-Wärmestrom von der Basislinie, die die rein sensible Wärmespeicherung im festen Zustand repräsentiert, abweicht. θ_1 kennzeichnet den Beginn des Schmelzvorgangs. θ^* ist die Temperatur, bei der der DSC-Wärmestrom das Niveau der Basislinie, die die rein sensible Wärmespeicherung im flüssigen Zustand repräsentiert, wieder erreicht. Aus messtechnischen Gründen liegt θ^* oberhalb der Peak-Temperatur θ_2 , die das Ende des Schmelzvorgangs darstellt [77].

$$\Delta H = \int_{\theta_1}^{\theta^*} \dot{Q}(\theta) \cdot \frac{1}{r} d\theta \quad [3-14]$$

Um die spezifische Latentwärme l [kJ/kg] zu bestimmen, muss der Anteil der sensiblen Wärmespeicherung (Fläche unter der Basislinie) vom Integral abgezogen werden und die Differenz durch die Masse des Probekörpers geteilt werden.

$$l = \frac{\Delta H}{m} - c_p \cdot (\theta^* - \theta_1) \quad \text{für: } c_{\text{solid}} = c_{\text{liquid}} = c_p \quad [3-15]$$

Bei Voruntersuchungen wurden experimentell geeignete Probenmassen für die Untersuchung des PCM-Putzes bestimmt. Bei einer konstanten Heizrate von 2 K/min kann eine in hohem Maße von der Probenmasse abhängige Peakform festgestellt werden. Die untersuchten Probenmassen betragen zwischen 63 mg und 3 mg (Abb. 3-7 und Abb. 3-8). Die Peak-Temperatur θ_2 der schwersten Proben liegt ca. 1.5 K über der Peak-Temperatur der leichtesten Probe. Der Betrag der gemessenen Latentwärme ist dagegen nicht von der Probenmasse abhängig und auch der Beginn des Schmelzens ist von der Masse des Probekörpers unabhängig. Bei schweren Probemassen wird aufgrund der endlichen Wärmeleitfähigkeit des Probekörpers der gemessene Temperaturbereich insgesamt breiter und die Peakform „verschmiert“. Bei verschiedenen DSC-Messungen konnte festgestellt werden, dass eine Probenmasse von $m < 12$ mg für das betrachtete Material empfehlenswert ist (Anhang 2).

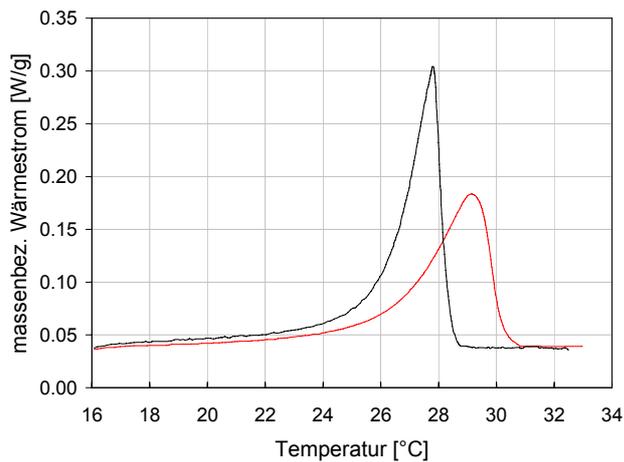


Abb. 3-7: PCM-Putz im DSC (Heizlauf)

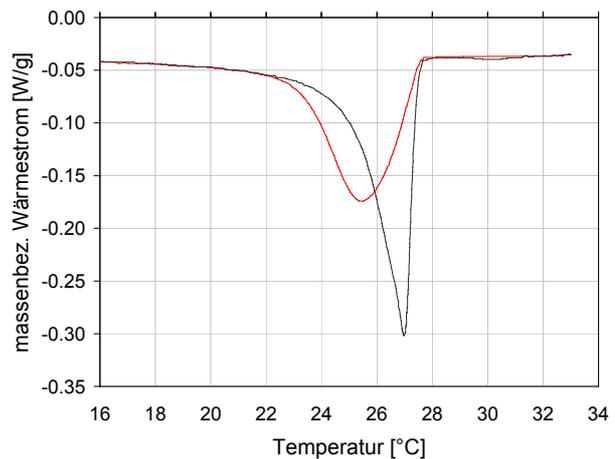


Abb. 3-8: PCM-Putz im DSC (Kühllauf)

Probenmasse: Rot: 63 mg; Schwarz: 3 mg

Für Probenmassen < 12 mg wurden Heizraten von 1 und 2 Kelvin pro Minute getestet, wobei sich kein signifikanter Unterschied in Latentwärmegehalt und Peakform ergab. Damit werden Ergebnisse von [78], die eine starke Abhängigkeit der DSC-Kurven von der Heizrate feststellen, für die verwendeten geringen Probenmassen und geringen Heizraten nicht bestätigt. Die Probenmasse konnte dagegen als entscheidender Faktor für Abweichungen identifiziert werden.

Der Beginn des Schmelzens θ_1 kann als Abweichung des Wärmestroms von einer als Basislinie gezogenen Geraden, die die sensible Wärmespeicherung repräsentiert, betrachtet werden. Aufgrund der geringen Steigung des Wärmestroms beim Schmelzbeginn und der leichten linearen Abhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität im festen Zustand (s. Kap. 3.3.3) birgt die genaue Festlegung des Schmelzbegins gewisse Unsicherheiten.

Die Bestimmung der Temperatur, bei der der Schmelzvorgang abgeschlossen ist und der Erstarrungsvorgang beginnt, bedarf im Hinblick auf Unterkühlungsvorgänge einer genaueren Betrachtung. Die Tatsache, dass die extrapolierte Onset-Temperatur⁷ beim Abkühlvorgang (Abb. 3-8) mit der Peak-Temperatur des Aufheizvorgangs nahezu übereinstimmt, lässt für den betrachteten PCM-Putz die Schlussfolgerung zu, dass das Ende des Schmelzvorgangs sehr gut mit der Peak-Temperatur übereinstimmt und das Material nur eine geringe Unterkühlung aufweist [77, 79].

Diese Schlussfolgerung brachte die für die Behandlung des Phasenübergangs im mathematischen Modell wichtige Erkenntnis, dass eine Unterkühlung beim Erstarrungsvorgang für den untersuchten PCM-Putz vernachlässigt werden kann. Damit ist der Temperaturbereich $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$ sowohl für den Schmelzvorgang als auch für den Erstarrungsvorgang gültig. Die Funktion $c(\theta)$ gilt im Phasenübergangsbereich unabhängig von der Richtung der Phasenumwandlung.

⁷ Im Folgenden wird die Temperatur, bei der der Wärmestrom maximal wird, als Peak-Temperatur bezeichnet. Die extrapolierte Onset-Temperatur ist der Schnittpunkt der Tangente an den maximalen Wärmestromgradienten mit der Basislinie, die die rein sensible Wärmespeicherung kennzeichnet.

Der Temperaturbereich $[\theta_1; \theta_2]$ des Phasenübergangs wurde nach qualitativer Betrachtung der DSC-Kurven auf $\theta_1 = 18.0^\circ\text{C}$ und $\theta_2 = 28.15^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ festgelegt. Die gemessene Peak-Temperatur lässt auf einen maßgeblichen Anteil von n-Oktadecan im untersuchten PCM-Putz schließen.

Die durchschnittliche spezifische Latentwärme des untersuchten PCM-Putzes aus 16 DSC-Messkurven (Anhang 2) ergab sich zu $l = 16.5 \text{ kJ/kg}$.

Die durchschnittliche Abweichung der Messwerte der spezifischen Latentwärme vom Mittelwert beträgt 0.81 [kJ/kg] bei einer Varianz von $\sigma^2 = 0.995 \text{ [(kJ/kg)}^2]$. Die Standardabweichung der spezifischen Schmelzwärme beträgt $\sigma = 0.997 \text{ [kJ/kg]}$.

3.3.5 Approximation der DSC-Messungen

Die 16 relevanten DSC-Messkurven bilden die Grundlage für die approximative Bestimmung der Funktion $c_{\text{latent}}(\theta)$ (s. Kap. 3.1.2, Gl. 3-11b). Zu diesem Zweck wurden die nicht digital vorliegenden Kurven eingescannt und jeweils 20 - 30 Messpunkte des Wärmestroms in Abhängigkeit von der Temperatur als Wertetabellen generiert. Die Umrechnung der DSC-Messwerte für den Wärmestrom in eine Funktion $c^*(\theta)$ unter Berücksichtigung von Gl. 3-14 und 3-15 erfolgt in einem ersten Schritt über den gesamten Temperaturbereich $[\theta_1; \theta^*]$, in dem eine Abweichung des Wärmestroms von der Basislinie, die die sensible Wärmespeicherung repräsentiert, festzustellen ist.

$$c^*(\theta) = \frac{\dot{Q}(\theta)}{m} \cdot \frac{1}{r} \quad [3-16]$$

Die so berechneten Werte für $c^*(\theta)$ sind in Abb. 3-9 und 3-10 für zwei unterschiedliche Proben zu sehen. Zu sehen ist neben der Funktion $c^*(\theta)$ die Basislinie, die dem Wert für c_{solid} entspricht, die Peak-Temperatur θ_2 und die Temperatur θ^* .

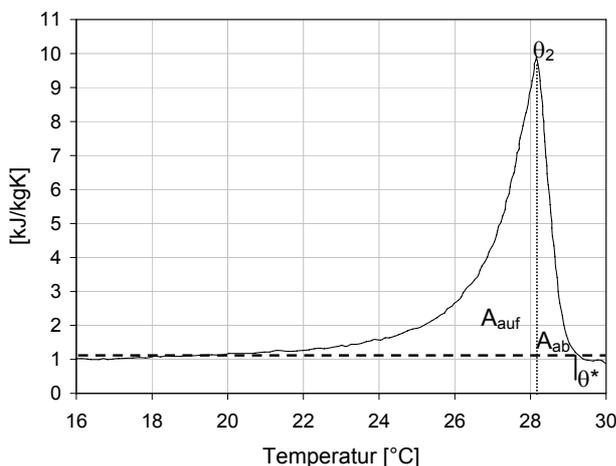


Abb. 3-9: $c^*(\theta)$ basierend auf DSC-Messung Juni 2004

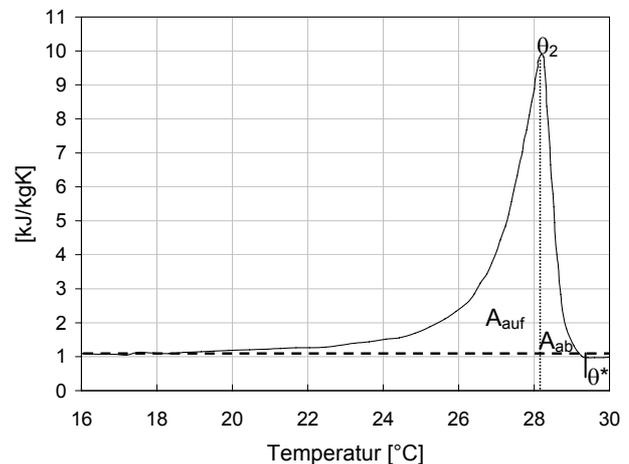


Abb. 3-10: $c^*(\theta)$ basierend auf DSC-Messung Nov 2004

Da mit Erreichen der Peak-Temperatur der Schmelzvorgang als abgeschlossen betrachtet werden kann [77], wurden im Weiteren die Funktionswerte in einen Bereich bis zur Peak-Temperatur θ_2 (aufsteigender Ast) und in einen Bereich ab der Peak-Temperatur θ_2 (abfallender Ast) eingeteilt. Um nun dem Temperaturbereich zwischen θ_1 und θ_2 die gesamte umsetzbare Latentwärme zuzuordnen, wird ein Korrekturwert eingeführt. Dieser ergibt sich aus dem Verhältnis der Flächeninhalte des auf-

steigenden Astes (A_{auf}) und des absteigenden Astes (A_{ab}). Die Flächen A_{auf} und A_{ab} werden jeweils von der Funktion $c^*(\theta)$, der Basislinie für c_{solid} und dem Lot der Peak-Temperatur eingeschlossen.

$$f_{korrr} = 1 + \frac{A_{ab}}{A_{auf}} \quad [3-17]$$

Damit ergibt sich die Beschreibung der Funktion $c_{latent}(\theta)$ auf Basis der DSC-Messungen wie folgt:

$$\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2: \quad c_{latent}(\theta) = \left(\frac{\dot{Q}(\theta)}{m} \cdot \frac{1}{r} - c_{solid} \right) \cdot f_{korrr} \quad [3-18]$$

Mit dem Approximationsprogramm Table Curve, das über mehr als 8000 mögliche Gleichungen verfügt, wurden die Wertetabellen aller 16 relevanten DSC-Kurven angenähert und die fünf besten Approximationstypen aufgelistet. Daraus konnten die sechs am häufigsten auftretenden Funktionstypen ermittelt werden.

Approximation	Häufigkeit*
$\ln y = \frac{a + cx + ex^2}{1 + bx + dx^2 + fx^3}$	10
$\ln y = \frac{a + cx + ex^2}{1 + bx + dx^2}$	6
$y^2 = \frac{a + cx^2 + ex^4 + gx^6}{1 + bx^2 + dx^4 + fx^6}$	6
$\sqrt{y} = \frac{a + cx + ex^2}{1 + bx + dx^2}$	6
$y = \frac{a + cx + ex^2}{1 + bx + dx^2}$	5
$y = \frac{a + c \cdot \ln x + e \cdot (\ln x)^2}{1 + b \cdot \ln x + d \cdot (\ln x)^2}$	4

Tab. 3-3: Approximation der DSC-Messungen (aufsteigender Ast)

*Häufigkeit des Auftretens unter den fünf besten Approximationsfunktionen

Die Determinationskoeffizienten der in Tab. 3-3 aufgeführten Approximationen lagen durchgängig bei $R^2 > 0.9999$. Unabdingbare Anforderung für die Auswahl einer geeigneten Approximation war neben dem Bestimmtheitsmaß R^2 und der Häufigkeit des Auftretens die Möglichkeit der analytischen Beschreibung der Stammfunktion.

Aus diesem Grund wurde aus den möglichen Funktionen die gebrochen-rationale Funktion mit Zähler- und Nenner-Polynom zweiten Grades für die Darstellung der Funktion $c_{latent}(\theta)$ gewählt:

$$c_{latent}(\theta) = \frac{a + c\theta + e\theta^2}{1 + b\theta + d\theta^2} \quad [3-19]$$

Für die hier verwendeten Koeffizienten und den Temperaturbereich von $[\theta_1 = 18^\circ\text{C}; \theta_2 = 28.1^\circ\text{C}]$ ergibt die Integration von Gl. 3-19 folgendes Integral:

$$\int c_{\text{latent}}(\theta) d\theta = \int \frac{a + c\theta + e\theta^2}{1 + b\theta + d\theta^2} d\theta = \frac{(2ad^2 + b^2e - bcd - 2de) \arctan\left(\frac{b + 2d\theta}{\sqrt{-b^2 + 4d}}\right)}{d^2 \sqrt{-b^2 + 4d}} + \frac{(cd - be) \ln(1 + b\theta + d\theta^2)}{2d^2} + \frac{e\theta}{d} \quad [3-20]$$

Die Approximation ergibt folgende mittlere Funktion für den untersuchten PCM-Putz:

$$c_{\text{latent}}(\theta) = \frac{-9.467 \cdot 10^1 + 7.117 \cdot \theta - 1.032 \cdot 10^{-1} \cdot \theta^2}{1 - 7.029 \cdot 10^{-2} \cdot \theta + 1.238 \cdot 10^{-3} \cdot \theta^2} \quad [3-21]$$

Gl. 3-19 wurde aufgrund ihrer hohen Anpassungsfähigkeit an empirisch bestimmte Verläufe des Latentwärmeumsatzes gewählt. Durch die einfache analytische Beschreibung und die analytische Integrierbarkeit ist diese Funktion für die Modellierung von Phasenübergängen geeignet. Mittels Integration über den Temperaturbereich des Phasenübergangs $[\theta_1; \theta_2]$ kann die Gültigkeit der Koeffizienten aus Gl. 3-21 überprüft werden.

$$I = \int_{\theta_1}^{\theta_2} c_{\text{latent}}(\theta) d\theta \quad [3-22]$$

Da der tatsächliche Verlauf des Phasenübergangs qualitativ leicht von der Form der DSC-Messung abweichen kann, erscheinen auch andere, vereinfachende Approximationsansätze gerechtfertigt. Für die Verwendung im numerischen Modell bietet sich eine Exponentialfunktion an:

$$c_{\text{latent}}(\theta) = \exp(a + b \cdot \theta) \quad [3-23]$$

Auf den untersuchten PCM-Putz angewendet lautet Gl. 3-23 wie folgt:

$$c_{\text{latent}}(\theta) = \exp(-11.902 + 0.762 \cdot \theta) \quad [3-24]$$

Auf die jeweiligen Vorteile von Gl. 3-19 und Gl. 3-23 wird in Kap. 6.2.1 näher eingegangen.

3.4 Modifiziertes Calcium-Chlorid-Hexahydrat

Im Rahmen dieser Arbeit und in Zusammenarbeit mit der Universität von Brno wurde in den Testräumen des Teilprojektes C5 des SFB 524 ein modifiziertes Salzhydrat untersucht. Hintergrund für diese Versuchsreihe waren Anstrengungen, die Latentwärmespeicherkapazität im Raum zu erhöhen. Voruntersuchungen in Brno ergaben viel versprechende Temperaturreduktionen von 4 K durch mit Salzhydrat gefüllte Kunststoffrohre in kleinen Testzellen. An der Bauhaus-Universität Weimar wurden von Sommer 2004 bis Herbst 2006 Messreihen im Versuchsstand Apolda durchgeführt. Dazu wurde das Salzhydrat in flüssigem Zustand in Polyethylen-Rohre mit einem Durchmesser von 5 cm und einer Länge von 3 m gefüllt. Der Volumenzunahme beim Schmelzen wurde Rechnung getragen, indem die Rohre einseitig mit Expansionsmembranen verschlossen wurden.

3.4.1 Chemische Modifikation

Der Basisstoff $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ wurde nach Empfehlungen von [27] modifiziert. $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ wurde zugesetzt, um die Unterkühlung des Salzhydrates zu verhindern. Die Zugabe von 2 % KCl und

0.5 % NaCl soll die Schmelztemperatur von 29.5°C auf 27°C senken und die Phasenseparation beim Schmelzen verhindern. Tab. 3-4 zeigt die Literaturwerte für reines und modifiziertes Calcium-Chlorid-Hexahydrat.

	CaCl ₂ *6H ₂ O	modifiziertes CaCl ₂ *6H ₂ O: 96.5 % CaCl ₂ *6H ₂ O 0.5 % NaCl 2 % KCl 1 % Ba(OH) ₂ *8H ₂ O
spezifische Latentwärme [kJ/kg]	191	192
Schmelztemperatur [°C]	29.6	27
spezifische Wärmekapazität im festen Zustand [kJ/kgK]	2.1	2.2
spezifische Wärmekapazität im flüssigen Zustand [kJ/kgK]	1.4	1.4
Wärmeleitfähigkeit im festen Zustand [W/mK]	0.54	0.54
Wärmeleitfähigkeit im flüssigen Zustand [W/mK]	1.09	1.09
Rohdichte im festen Zustand [kg/m ³]	1562	1530
Rohdichte im flüssigen Zustand [kg/m ³]	1802	1710

Tab. 3-4: Thermische Eigenschaften des reinen CaCl₂*6H₂O und des modifizierten Stoffes nach [27]

Die Literaturwerte wurden für kleine Probenmengen des modifizierten Salzhydrats und bei Erhitzung auf hohe Temperaturen erreicht [80]. Im Großversuch traten teilweise Phasenseparation und Hydratation durch Undichtigkeiten auf. Die durch die Phasenseparation hervorgerufene Entmischung der Additive von der Basissubstanz führte zu Unterkühlungseffekten. Die DSC-Messung ergab eine durchschnittliche spezifische Latentwärme von 172 kJ/kg.

3.4.2 Phasenseparation des modifizierten CaCl₂*6H₂O

Eine Phasenseparation des CaCl₂*6H₂O konnte erstmals im Herbst 2004 festgestellt werden. Trotz kalter Temperaturen, die den Erstarrungspunkt des Salzhydrats unterschritten, lag in einigen Rohren eine flüssige Phase vor. Gleichzeitig wurden an einzelnen Rohren Undichtigkeiten festgestellt, die die flüssige Phase aus dem Makroelement austreten ließen.

Phasenseparation kann auftreten, da Hexahydrat nach Erreichen seines Schmelzpunktes bei 27°C nicht in die flüssige Phase übergeht, sondern zunächst Tetrahydrat CaCl₂*4H₂O und eine Phase aus überwiegend Wasseranteilen bildet. Aufgrund der deutlich höheren Dichte des Tetrahydrats setzt sich dieses als Bodensatz ab. Um die Schmelze beim Abkühlen vollständig in Hexahydrat umzuwandeln, muss der Bodensatz auf Temperaturen erwärmt werden, die deutlich höher sind als der eigentliche Schmelzpunkt, da Tetrahydrat ansonsten nicht schmilzt [73].

3.4.3 Unterkühlung des modifizierten CaCl₂*6H₂O

Um die thermischen Eigenschaften des modifizierten Salzhydrats nach einigen Monaten Einsatz in den Versuchsräumen zu überprüfen, wurden Differential-Scanning-Calorimeter (DSC) Messungen durchgeführt. Abb. 3-11 zeigt die Unterkühlung der aus den Makroelementen entnommenen Probe. Reproduzierbar ist der Schmelzvorgang nachdem die Probe während des ersten Aufheizens auf Temperaturen über 35°C gebracht wurde. Der Kühlvorgang ist nicht reproduzierbar. Deutlich erkennbar ist ein nicht kongruentes Erstarren.

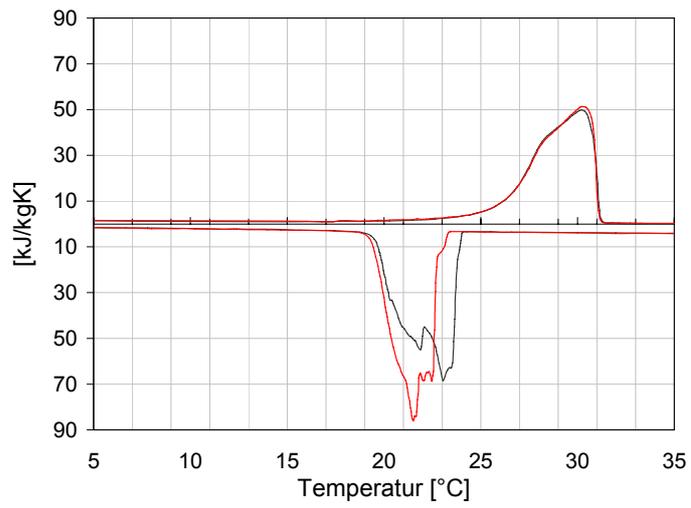


Abb. 3-11: $c^*(\theta)$ basierend auf DSC-Messung

Schwarz: 1. Messung, Rot: 2. Messung

4 Mathematische Beschreibung des Phasenübergangs

Für konventionelle Baumaterialien, die keinen Phasenübergang aufweisen, wurden Temperaturprofile bei unterschiedlichen Randbedingungen bereits eingehend untersucht, um Rückschlüsse auf das thermische Verhalten eines Bauteils ziehen zu können [81, 82]. Um weitergehende Untersuchungen der Temperaturprofile von Phasenübergangsmaterialien durchzuführen, werden numerische Methoden benötigt, da die analytische Lösung auf einfache Fälle begrenzt ist.

4.1 Analytische Lösung

Die Wärmeleitungsgleichung hat für kontinuierliche Phasenübergänge keine Lösung, die durch eine analytische Funktion in geschlossener Form dargestellt werden kann [83]; ein numerischer Ansatz wird in Kap. 4.2 vorgestellt. Für Phasenübergänge erster Art lassen sich unter eng definierten Randbedingungen exakte analytische Lösungen finden.

4.1.1 Exakte Lösungen des Phasenübergangs erster Art

Im Folgenden wird die Lösung der zeit- und ortsabhängigen Temperaturverteilung in einem homogenen Bauteil mit Phasenübergang für den eindimensionalen Fall angegeben. Dabei wird eine Phasengrenze angenommen, die sich während des Schmelz- bzw. Erstarrungsvorgangs in positiver x -Richtung bewegt. Die Ortsbeschreibung der Phasengrenze wird durch die Funktion $s(t)$ ausgedrückt. Das betrachtete Bauteil ist halbumendlich ausgedehnt mit Randbedingungen dritter Art: Konstante Temperatur an den Stellen $x = 0$, $x = s(t)$, $x \rightarrow \infty$ und vorgegebener Wärmestrom an der Stelle $x = s(t)$. Diesseits und jenseits der Phasengrenze liegt das Material in rein flüssiger Phase bzw. rein fester Phase vor.

Im einfachsten Fall wird eine zeit- und ortsabhängige Temperaturverteilung nur auf der flüssigen bzw. der festen Seite der Phasengrenze angenommen, d.h. die Temperatur des Materials im festen bzw. flüssigen Zustand ist konstant und entspricht genau der Phasenübergangstemperatur θ_P . Mit dieser Vereinfachung lassen sich Erstarrungsvorgänge und Schmelzvorgänge ebenso wie Erstarrungsvorgänge unterkühlter PCM für bestimmte Fälle hinreichend beschreiben (s. Anhang 3). Die Besonderheit bei der analytischen Lösung der Erstarrung eines unterkühlten Phasenübergangsmaterials ist die Tatsache, dass das PCM in der flüssigen Phase ein niedrigeres Temperaturniveau hat als in der festen Phase.

Bei der Betrachtung des Phasenübergangs als einen diskontinuierlichen Prozess, der eine scharf definierte Phasenübergangsgrenze annimmt, führt ein Dichteunterschied zwischen festem und flüssigem Zustand, wie er bei realen Materialien meist zu finden ist (i. A. ist die Dichte im festen Zustand größer als im flüssigen Zustand), zu einer Konvektion an der Phasengrenze. Diese Flüssigkeitsbewegung an der Phasengrenze wird bei der folgenden Betrachtung vernachlässigt. Hinweise zu den Auswirkungen eines Dichteunterschiedes auf die analytische Lösung sind in [84] zu finden.

Die allgemeine Formulierung des Phasenübergangs berücksichtigt die zeit- und ortsabhängige Temperaturverteilung sowohl im festen wie auch im flüssigen Zustand gemäß der Fourier'schen Wärmeleitungsgleichung in einem homogenen Bauteil mit konstanter Temperaturleitfähigkeit:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad \text{für} \quad a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} = \text{konst.} \quad [4-1]$$

Zum Zeitpunkt $t = 0$ befindet sich das gesamte Bauteil für $x > 0$ auf der Temperatur θ_i . Am linken Rand ($x = 0$) wird die Temperatur auf θ_0 angehoben, d. h. der Schmelzvorgang setzt ein (Abb. 4-1a), bzw. die Temperatur wird auf θ_0 abgesenkt, d. h. der Erstarrungsvorgang setzt ein (Abb. 4-1b).

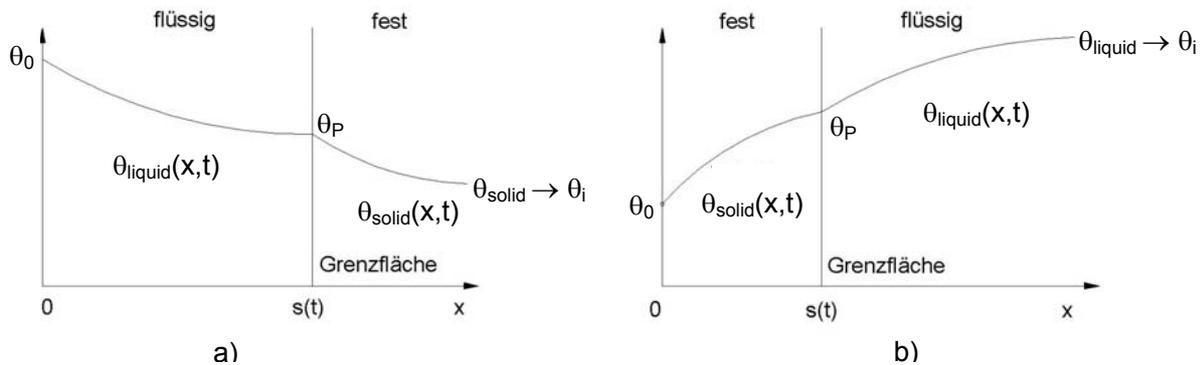


Abb. 4-1a und 4-1b: Temperaturverteilung im halbseitig unendlich ausgedehnten Raum (eindimensional)
a: Schmelzvorgang; b: Erstarrungsvorgang;

Temperaturverteilung im festen Zustand:

$$a_{\text{solid}} \cdot \frac{\partial^2 \theta_{\text{solid}}}{\partial x^2} = \frac{\partial \theta_{\text{solid}}}{\partial t} \quad [4-2]$$

Temperaturverteilung im flüssigen Zustand:

$$a_{\text{liquid}} \cdot \frac{\partial^2 \theta_{\text{liquid}}}{\partial x^2} = \frac{\partial \theta_{\text{liquid}}}{\partial t} \quad [4-3]$$

Die Anfangs- und Randbedingungen für den Schmelzvorgang lauten wie folgt:

$$\theta_{\text{solid}}(x, t) = \theta_i \quad \text{für } t = 0; x > 0 \quad [4-4a]$$

$$\theta_{\text{liquid}}(x, t) = \theta_0 \quad \text{für } x = 0; t > 0 \quad [4-4b]$$

$$\theta_{\text{liquid}}(x, t) = \theta_{\text{solid}}(x, t) = \theta_P \quad \text{für } x = s(t); t > 0 \quad [4-4c]$$

$$\theta_{\text{solid}}(x, t) \rightarrow \theta_i \quad \text{für } x \rightarrow \infty; t > 0 \quad [4-4d]$$

Die Anfangs- und Randbedingungen für den Erstarrungsvorgang lauten wie folgt:

$$\theta_{\text{liquid}}(x, t) = \theta_i \quad \text{für } t = 0; x > 0 \quad [4-5a]$$

$$\theta_{\text{solid}}(x, t) = \theta_0 \quad \text{für } x = 0; t > 0 \quad [4-5b]$$

$$\theta_{\text{solid}}(x, t) = \theta_{\text{liquid}}(x, t) = \theta_P \quad \text{für } x = s(t); t > 0 \quad [4-5c]$$

$$\theta_{\text{liquid}}(x, t) \rightarrow \theta_i \quad \text{für } x \rightarrow \infty; t > 0 \quad [4-5d]$$

Das Fortschreiten der Phasengrenze bestimmt sich aus den links- und rechtsseitigen Wärmestromdichten an der Stelle $x = s(t)$ [83].

Gemäß [83] gilt an der Phasengrenze für beide Fälle:

$$\lambda_{\text{solid}} \cdot \frac{\partial \theta_{\text{solid}}}{\partial x} - \lambda_{\text{liquid}} \cdot \frac{\partial \theta_{\text{liquid}}}{\partial x} = \rho \cdot l \cdot \frac{ds(t)}{dt} ; \text{ für } x = s(t); t > 0 \quad [4-6]$$

Es gilt:
$$k = \frac{s(t)}{2 \cdot \sqrt{a_{\text{solid}} \cdot t}} \quad [4-7]$$

Die Temperaturverteilung für den Schmelzvorgang entspricht:

$$\theta_{\text{liquid}}(x,t) = \theta_0 + \frac{\theta_P - \theta_0}{\operatorname{erf}\left[k \cdot \sqrt{\frac{a_{\text{solid}}}{a_{\text{liquid}}}}\right]} \cdot \operatorname{erf}\left[\frac{x}{2\sqrt{a_{\text{liquid}} \cdot t}}\right] \quad [4-8]$$

$$\theta_{\text{solid}}(x,t) = \theta_i + \frac{\theta_P - \theta_i}{\operatorname{erfc}[k]} \cdot \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2\sqrt{a_{\text{solid}} \cdot t}}\right] \quad [4-9]$$

Mit der Bestimmungsgleichung für den Parameter k:

$$\frac{e^{-k^2}}{\operatorname{erfc}[k]} + \frac{\lambda_{\text{liquid}}}{\lambda_{\text{solid}}} \cdot \frac{\theta_P - \theta_0}{\theta_P - \theta_i} \cdot \sqrt{\frac{a_{\text{solid}}}{a_{\text{liquid}}}} \cdot \frac{\exp\left(-k^2 \cdot \frac{a_{\text{solid}}}{a_{\text{liquid}}}\right)}{\operatorname{erf}\left[k \cdot \sqrt{\frac{a_{\text{solid}}}{a_{\text{liquid}}}}\right]} = k \cdot \frac{l \cdot \sqrt{\pi}}{c_{\text{solid}} \cdot (\theta_i - \theta_m)} \quad [4-10]$$

Die Temperaturverteilung für den Erstarrungsvorgang entspricht:

$$\theta_{\text{solid}}(x,t) = \theta_0 + \frac{\theta_P - \theta_0}{\operatorname{erf}[k]} \cdot \operatorname{erf}\left[\frac{x}{2\sqrt{a_{\text{solid}} \cdot t}}\right] \quad [4-11]$$

$$\theta_{\text{liquid}}(x,t) = \theta_i + \frac{\theta_P - \theta_i}{\operatorname{erfc}\left[k \cdot \sqrt{\frac{a_{\text{solid}}}{a_{\text{liquid}}}}\right]} \cdot \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2\sqrt{a_{\text{liquid}} \cdot t}}\right] \quad [4-12]$$

Mit der Bestimmungsgleichung für den Parameter k:

$$\frac{e^{-k^2}}{\operatorname{erf}[k]} + \frac{\lambda_{\text{liquid}}}{\lambda_{\text{solid}}} \cdot \frac{\theta_P - \theta_i}{\theta_P - \theta_0} \cdot \sqrt{\frac{a_{\text{solid}}}{a_{\text{liquid}}}} \cdot \frac{\exp\left(-k^2 \cdot \frac{a_{\text{solid}}}{a_{\text{liquid}}}\right)}{\operatorname{erfc}\left[k \cdot \sqrt{\frac{a_{\text{solid}}}{a_{\text{liquid}}}}\right]} = k \cdot \frac{l \cdot \sqrt{\pi}}{c_{\text{solid}} \cdot (\theta_P - \theta_0)} \quad [4-13]$$

Abb. 4-2a und 4-3a stellen die Temperaturverteilung in den ersten 10 cm eines halbindefiniten Bauteils während des Schmelz- bzw. während des Erstarrungsvorgangs dar. Dabei werden die ersten 10 Stunden des Phasenwechsels betrachtet. Aufgrund der unterschiedlichen Materialeigenschaften im flüssigen und festen Zustand des PCM ist der Verlauf der Phasengrenze bei 29°C deutlich zu erkennen.

Abb. 4-2b und 4-3b geben diesen Verlauf der Phasengrenze in Abhängigkeit von Ort und Zeit im Bauteil wieder. Aus den Abbildungen kann abgelesen werden, nach welcher Zeit eine bestimmte Bauteildicke unter den gegebenen Randbedingungen komplett erstarrt bzw. komplett geschmolzen ist.

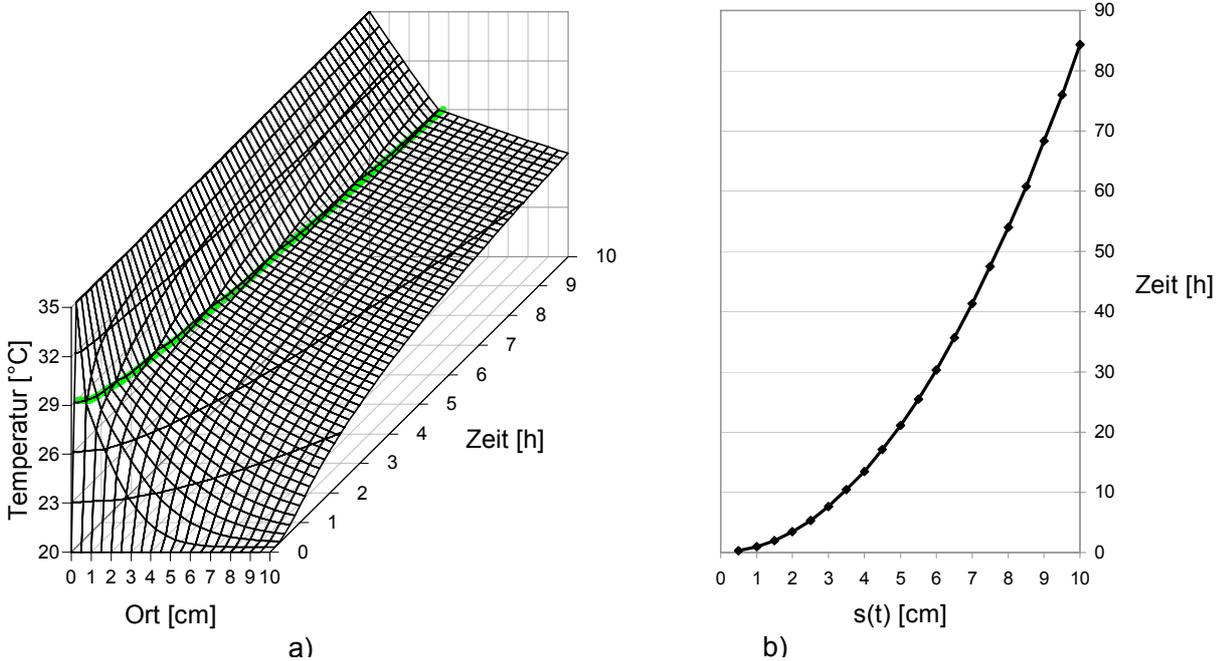


Abb. 4-2a und b: Fortschreiten der Phasengrenze beim Schmelzvorgang (Materialeigenschaften s. Tab. 3-4)

a: Dreidimensionale Darstellung der Temperaturverteilung: $35^{\circ}\text{C} > \theta_{\text{liquid}} > 29^{\circ}\text{C}$ und $29^{\circ}\text{C} > \theta_{\text{solid}} > 20^{\circ}\text{C}$
 b: Verlauf der Phasengrenze der ersten 10 cm eines halbusendlich ausgedehnten Körpers

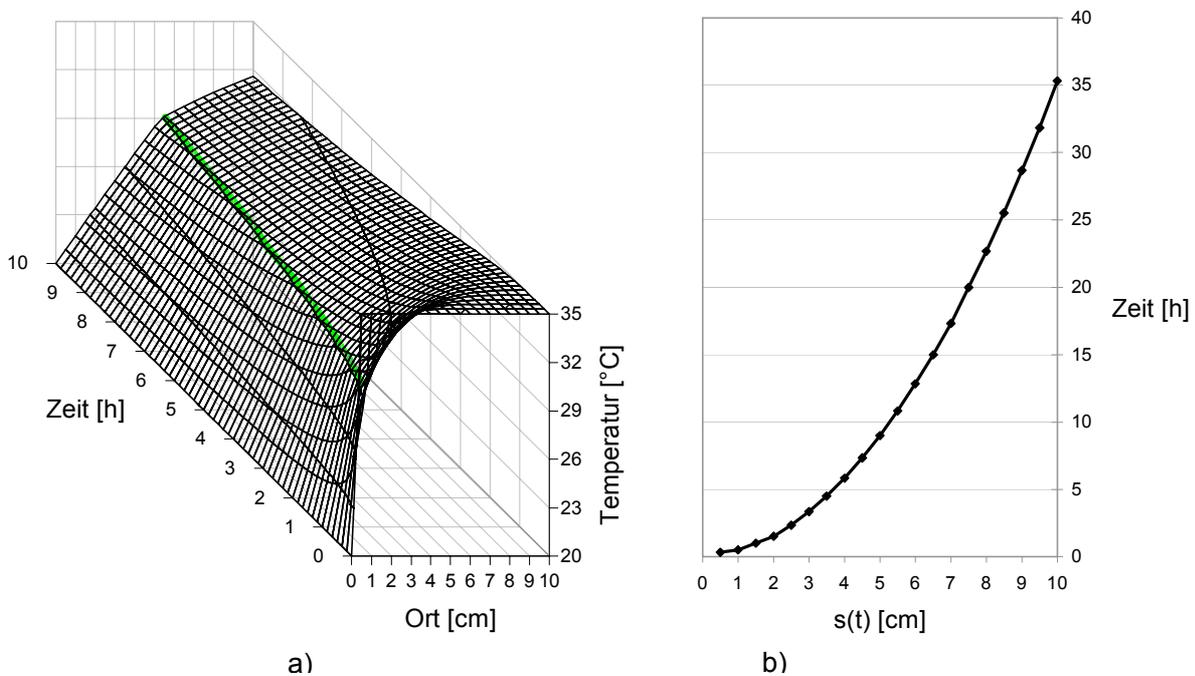


Abb. 4-3a und b: Fortschreiten der Phasengrenze beim Erstarrungsvorgang (Materialeigenschaften s. Tab. 3-4)

a: Dreidimensionale Darstellung der Temperaturverteilung: $35^{\circ}\text{C} > \theta_{\text{liquid}} > 29^{\circ}\text{C}$ und $29^{\circ}\text{C} > \theta_{\text{solid}} > 20^{\circ}\text{C}$
 b: Verlauf der Phasengrenze der ersten 10 cm eines halbusendlich ausgedehnten Körpers

4.1.2 Näherungsweise Lösungen des Phasenübergangs erster Art

Obwohl das untersuchte PCM keinen reinen Phasenübergang erster Art, sondern einen kontinuierlichen Phasenübergang aufweist, ist die Betrachtung des thermischen Verhaltens eines Materials unter Annahmen einer diskreten Schmelztemperatur θ_P interessant, um Abschätzungen über Schmelz- und Erstarrungszeiten zu erhalten.

Eine gebräuchliche Methode zur näherungsweisen Bestimmung der Temperaturverteilung in einem PCM-Bauteil ist die Integralmethode. Dabei wird die partielle Differenzialgleichung der Wärmeleitung über eine fiktive Distanz $\delta(t)$ integriert, wobei gilt, dass an den Rändern des Gebietes $[0; \delta(t)]$ der Wärmestrom gleich Null ist. Damit entsteht eine gewöhnliche Differenzialgleichung, die über einen Polynomansatz gelöst werden kann. Die Koeffizienten des Polynoms sind zeitabhängig und können über die Randbedingungen bestimmt werden. Die Anwendung der Integralmethode auf Phasenübergangsvorgänge ist in [83, 85] und anderen beschrieben.

Eine vereinfachte Betrachtungsweise von Erstarrungs- und Schmelzvorgängen ist die Annahme eines stationären Wärmetransports im Medium. Diese Annahme kann dann gerechtfertigt werden, wenn die sensible Wärmespeicherung bei einer gegebenen Temperaturdifferenz deutlich geringer als die latente Wärmespeicherung ist. Die entsprechende Größe wird als Stefan-Zahl⁸ bezeichnet:

$$\text{Ste} = \frac{l}{c \cdot (\theta_P - \theta_0)} \quad [4-14]$$

Bei großen Stefan-Zahlen ($\text{Ste} > 10$) führt die quasi-stationäre Betrachtung der Temperaturverteilung im Bauteil zu relativ guten Übereinstimmungen mit der exakten Lösung [87]. Dabei wird analog zu den Annahmen für die exakte analytische Lösung in Anhang 3 beim Erstarrungsvorgang eine uniforme Temperatur im flüssigen PCM und beim Schmelzvorgang eine uniforme Temperatur im festen PCM angenommen. Diese uniforme Temperatur ist genau die Schmelztemperatur θ_P . Die stationäre Betrachtung wird auf die Temperaturverteilung im bereits erstarrten Bereich bzw. im bereits geschmolzenen Bereich angewandt. Sie ermöglicht, bei einer gegebenen Bauteildicke d , eine einfache Berechnung der Erstarrungszeit bzw. der Schmelzdauer.

Die Bedingung an der Phasengrenze wird dabei wie folgt formuliert [86]:

$$\frac{dx}{d\tau} \cdot \rho \cdot l = \frac{\lambda}{(d-x)} \cdot (\theta_P - \theta_0) \quad [4-15]$$

Die Zeitkonstante τ für den Schmelzvorgang bzw. den Erstarrungsvorgang ergibt sich nach Umstellen und Integration bis zur Stelle $x = d$.

⁸ Phasenübergangsprobleme werden häufig als Stefan-Probleme bezeichnet nach J. Stefan, der im Jahre 1889 vier wegweisende Artikel über Randwertprobleme des Wärmetransports veröffentlichte, darunter: Über die Theorie der Eisbildung, insbesondere über die Eisbildung im Polarmeer [87]

Schmelzvorgang:

$$\tau_{\text{melt}} = \frac{\rho \cdot l}{\lambda_{\text{liquid}} \cdot (\theta_0 - \theta_P)} \cdot \frac{d^2}{2} \quad \theta_0 > \theta_P \quad [4-16]$$

Erstarrungsvorgang:

$$\tau_{\text{solid}} = \frac{\rho \cdot l}{\lambda_{\text{solid}} \cdot (\theta_P - \theta_0)} \cdot \frac{d^2}{2} \quad \theta_P > \theta_0 \quad [4-17]$$

Abb. 4-4 und 4-5 vergleichen die exakten analytischen Lösungen des Fortschreitens der Phasengrenze für ein halbumendliches Bauteil (s. Kap. 4.1.1) mit den Schmelz- bzw. Erstarrungszeiten gemäß Gl. 4-16 und 4-17, die für endliche Bauteile der Dicke d unter Annahme eines stationären Wärmetransports berechnet wurden. Beim Putz sind die in Abb. 4-4a und 4-5a sichtbaren Abweichungen darauf zurückzuführen, dass die spezifische Latentwärme gegenüber der sensiblen Wärmespeicherung bei einer Temperaturdifferenz von 8 K (Erstarrung) bzw. 7 K (Schmelze) nur um den Faktor 2 erhöht ist. Beim Salzhydrat ergibt sich gegenüber der latenten Wärmespeicherung ein Verhältnis der sensiblen Wärmespeicherung von 1:13 bei Temperaturdifferenzen von 9 K (Erstarrung) bzw. 6 K (Schmelze).

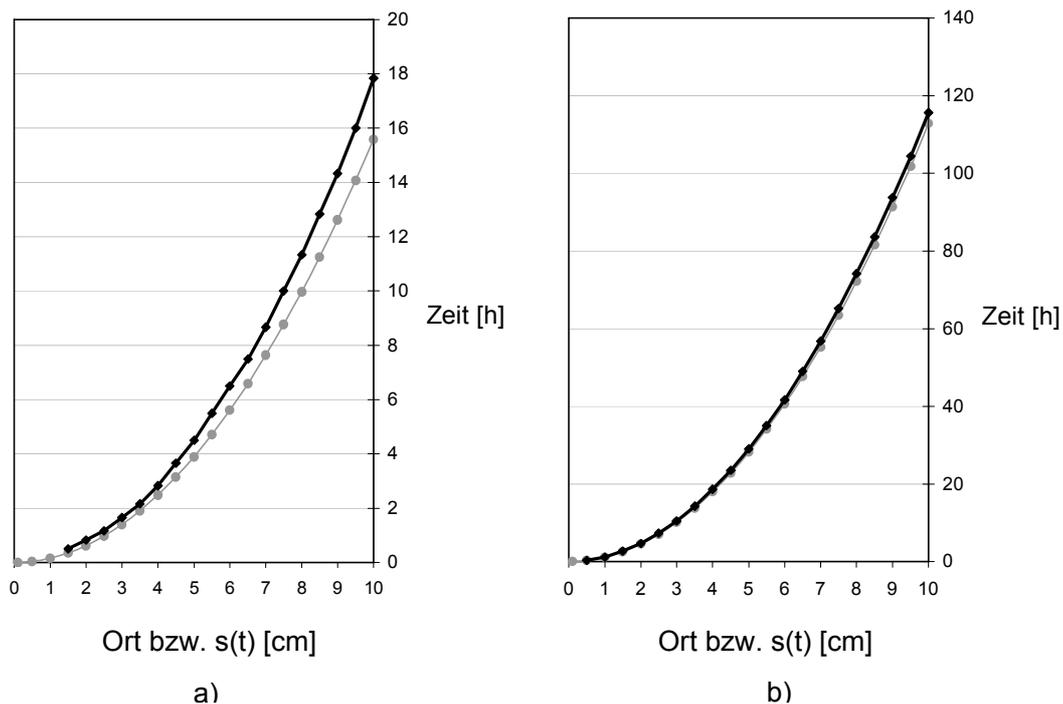


Abb. 4-4a und 4-4b: Phasengrenze beim Schmelzvorgang

a: PCM-Putz, Stefan-Zahl nach Gl.4-16: $Ste = 2.4$

b: Salzhydrat nach Tab. 3-4, Stefan-Zahl nach Gl.4-16: $Ste = 13.0$

Schwarz: Exakte Lösung des Verlaufs von $s(t)$ in den ersten 10 cm eines halbumendlichen Bauteils

Grau: Schmelzdauer in Abhängigkeit von der Bauteildicke unter Annahme von stationärem Wärmetransport

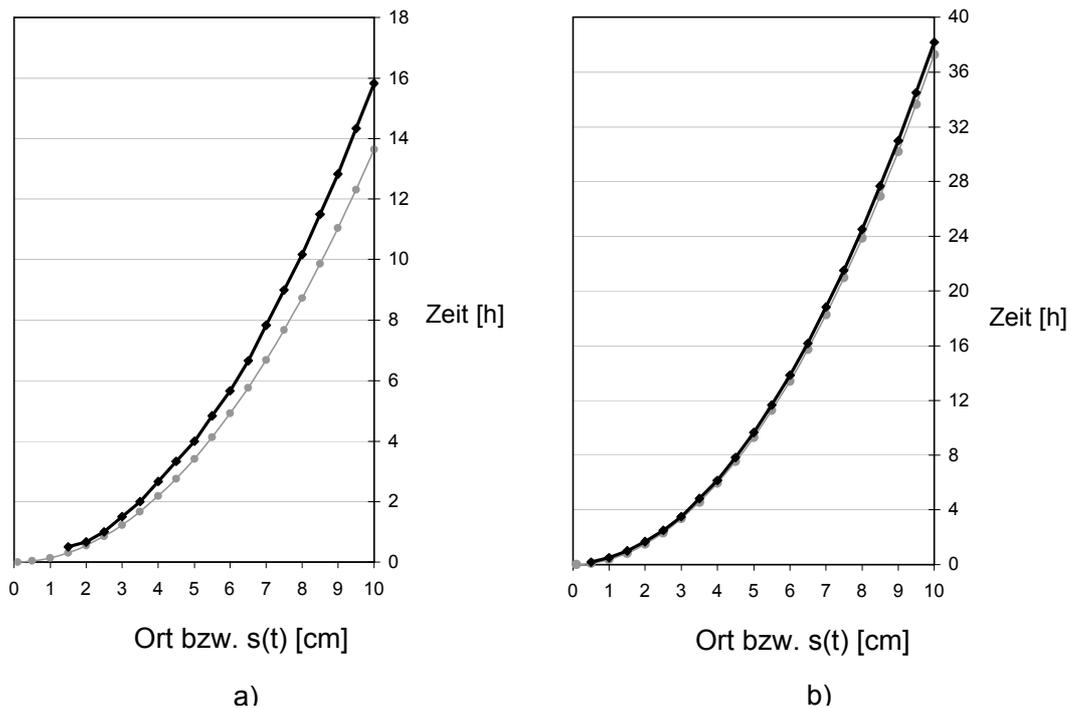


Abb. 4-5a und 4-5b: Phasengrenze beim Erstarrungsvorgang

a: PCM-Putz, Stefan-Zahl nach Gl.4-17: $Ste = 2.1$

b: Salzhydrat nach Tab. 3-4, Stefan-Zahl nach Gl.4-17: $Ste = 13.7$

Schwarz: Exakte Lösung des Verlaufs von $s(t)$ in den ersten 10 cm eines halbumendlichen Bauteils

Grau: Erstarrungsdauer in Abhängigkeit von der Bauteildicke unter Annahme von stationärem Wärmetransport

4.2 Numerische Lösung

Die exakten und näherungsweise analytischen Lösungen des Phasenübergangproblems sind auf einige wenige und sehr vereinfachende Randbedingungen beschränkt. Temperaturverhältnisse an den Rändern von Raumbegrenzungsbauteilen (z. B. Wandoberflächen) sind jedoch im Allgemeinen sehr komplex, da sie von der Luftkonvektion, dem langwelligen Strahlungsaustausch und evt. der Absorption kurzwelliger Strahlung bestimmt werden. Der Einsatz numerischer Methoden zur Lösung des Phasenübergangs in einem Bauteil unter Berücksichtigung des umgebenden Raums ist daher unumgänglich.

4.2.1 Finite-Differenzen-Verfahren zur Lösung der Wärmeleitungsgleichung (konst. Koeff.)

Finite-Differenzen-Verfahren zur Lösung der parabolischen Differentialgleichung der Form

$$\frac{\partial y(u, z)}{\partial u} = k \cdot \frac{\partial^2 y(u, z)}{\partial z^2} \quad k = \text{konst.} \quad [4-18]$$

sind hinlänglich bekannt und bieten sich bei ingenieurtechnischen Untersuchungen aufgrund ihrer einfachen Programmierbarkeit an. Die oben genannte DGL entspricht der Form der Fourier'schen Wärmeleitungsgleichung eines homogenen Stoffes mit konstanter Temperaturleitfähigkeit im eindimensionalen Raum:

$$\frac{\partial \theta(x,t)}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \cdot \frac{\partial^2 \theta(x,t)}{\partial x^2} \quad [4-19]$$

Das Finite-Differenzen-Verfahren diskretisiert die infinitesimal kleinen Differentiale ∂x zu Δx und ∂t zu Δt . Bei der Berechnung der Temperaturen, die keinen Randbedingungen unterliegen, bietet sich die Einführung der Fourier-Zahl an:

$$Fo = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad [4-20]$$

Möglichkeiten zur numerischen Lösung bestehen einerseits in einem expliziten Verfahren, das zur Berechnung der unbekanntem Größe des nächsten Zeitschritts nur bekannte Größen des vorherigen Zeitschritts heranzieht oder in impliziten Verfahren, deren Gleichungssysteme über Matrizeninversion zu lösen sind. Gl. 4-21 stellt die allgemeine Form der Finite-Differenzen-Verfahren zur Lösung von Gl. 4-1 dar. Dabei bezeichnet s bzw. $s+1$ den jeweiligen Zeitschritt ($s+1 = s+\Delta t$) und n den betrachteten Knotenpunkt mit $n-1$ und $n+1$ als benachbarte Knotenpunkte.

$$\theta_n^{s+1} - \theta_n^s = Fo \cdot \gamma \cdot (\theta_{n+1}^{s+1} - 2 \cdot \theta_n^{s+1} + \theta_{n-1}^{s+1}) + Fo \cdot (1 - \gamma) \cdot (\theta_{n+1}^s - 2 \cdot \theta_n^s + \theta_{n-1}^s) \quad [4-21]$$

Je nach Wahl des so genannten Implizitheitsgrades γ ergeben sich die folgenden Modelle:

$\gamma = 0$: Explizites Modell:

$$\theta_n^{s+1} - \theta_n^s = Fo \cdot (\theta_{n+1}^s - 2 \cdot \theta_n^s + \theta_{n-1}^s) \quad [4-21a]$$

$\gamma = 1$: Implizites Modell:

$$\theta_n^{s+1} - \theta_n^s = Fo \cdot (\theta_{n+1}^{s+1} - 2 \cdot \theta_n^{s+1} + \theta_{n-1}^{s+1}) \quad [4-21b]$$

Spezialfall: $\gamma = 0.5$: Crank-Nicholson-Modell:

$$\theta_n^{s+1} - \theta_n^s = Fo \cdot \left(\frac{\theta_{n+1}^{s+1} + \theta_{n+1}^s}{2} - (\theta_n^{s+1} + \theta_n^s) + \frac{\theta_{n-1}^{s+1} + \theta_{n-1}^s}{2} \right) \quad [4-21c]$$

Aufgrund von Stabilitätsproblemen bei der expliziten Lösung des Wärmeleitungsproblems, das kleine Fourier-Zahlen erfordert, ist einem impliziten Modell mit $\gamma \geq 0.5$ der Vorzug zu geben. Bei der Untersuchung von komplexen Teilproblemen und unter der Voraussetzung, dass eine entsprechend kleine Zeitschrittweite gewählt werden kann, bietet sich das explizite Modell aufgrund seiner klaren Struktur an.

Während Gl. 4-21 der numerischen Lösung der Temperaturverteilung in einem homogenen Material entsprechen, erfordert die Behandlung der Ränder besondere Sorgfalt bei der Wahl der örtlichen Diskretisierung. Am Beispiel des expliziten Modells werden im Folgenden die Gleichungen für die Randpunkte und für das Bauteilinnere gemäß Abb. 4-6 unter Annahme einer konstanten Wärmeleitfähigkeit dargestellt.

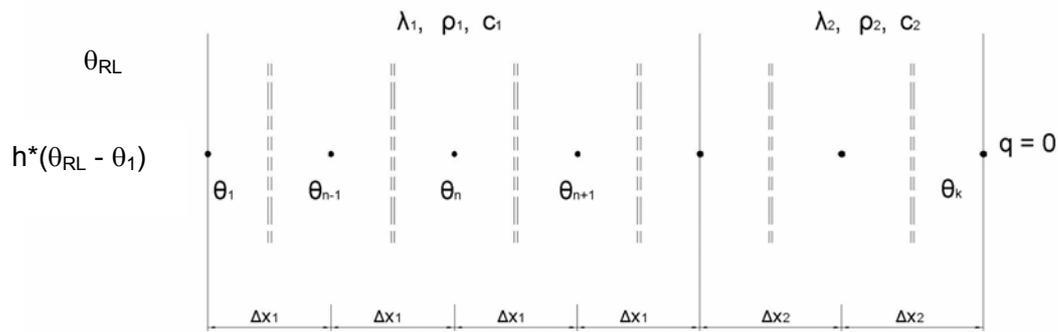


Abb. 4-6: Diskretisierungsschema für numerisches Modell

Oberflächenpunkt mit konvektivem Wärmeübergang:

$$\rho_1 \cdot c_1 \cdot \left[\frac{\theta_n^{s+1}}{\Delta t} - \frac{\theta_n^s}{\Delta t} \right] \cdot \frac{\Delta x_1}{2} = h \cdot (\theta_L - \theta_n^s) - \frac{\lambda_1}{\Delta x_1} (\theta_n^s - \theta_{n+1}^s) \quad [4-22]$$

Homogenes Bauteilinneres (hier Schicht 1):

$$\rho_1 \cdot c_1 \cdot \left[\frac{\theta_n^{s+1}}{\Delta t} - \frac{\theta_n^s}{\Delta t} \right] = \frac{\lambda_1}{\Delta x_1^2} (\theta_{n-1}^s - \theta_n^s) - \frac{\lambda_1}{\Delta x_1^2} (\theta_n^s - \theta_{n+1}^s) \quad [4-23]$$

Grenzpunkt zweier Schichten:

$$\frac{\rho_1 \cdot c_1 \cdot \Delta x_1}{2} + \frac{\rho_2 \cdot c_2 \cdot \Delta x_2}{2} \cdot \left[\frac{\theta_n^{s+1}}{\Delta t} - \frac{\theta_n^s}{\Delta t} \right] = \frac{\lambda_1}{\Delta x_1} (\theta_{n-1}^s - \theta_n^s) - \frac{\lambda_2}{\Delta x_2} (\theta_n^s - \theta_{n+1}^s) \quad [4-24]$$

Adiabatischer Abschluss (hier Schicht 2):

$$\rho_2 \cdot c_2 \cdot \left[\frac{\theta_n^{s+1}}{\Delta t} - \frac{\theta_n^s}{\Delta t} \right] \cdot \frac{\Delta x_2}{2} = \frac{\lambda_2}{\Delta x_2} (\theta_{n-1}^s - \theta_n^s) \quad [4-25]$$

4.2.2 Wärmekapazität als Funktion der Temperatur

Der untersuchte PCM-Putz weist keinen Phasenübergang erster Art auf, sondern ändert seinen Aggregatzustand über einen gewissen Temperaturbereich. Dieser Temperaturbereich wird im Folgenden durch die Grenztemperaturen θ_1 (= Übergang zwischen festem Zustand und Phasenübergangsbereich) und θ_2 (= Übergang zwischen flüssigem Zustand und Phasenübergangsbereich) festgelegt. Da das Material nur in sehr geringem Maße ein Unterkühlungsverhalten zeigt, wird im numerischen Modell die Temperatur θ_2 sowohl als Ende des Schmelzens wie auch als Beginn der Erstarrung festgelegt.

Zur Beschreibung des Phasenübergangs wird der Ansatz einer temperaturabhängigen Wärmekapazität $c(\theta)$ im Temperaturbereich $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$ gewählt. Der Wert für $c(\theta)$ wird abschnittsweise definiert (s. Kap. 3.1.2).

$$\begin{aligned} \theta < \theta_1: & \quad c(\theta) = c_{\text{solid}} \\ \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2: & \quad c(\theta) = c_{\text{solid}} + c_{\text{latent}}(\theta) \\ \theta > \theta_2: & \quad c(\theta) = c_{\text{liquid}} \end{aligned}$$

4.2.3 Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Temperatur

Bei manchen Phasenübergangsmaterialien ändert sich die Wärmeleitfähigkeit abhängig vom Aggregatzustand. Der Wert für Lambda kann um den Faktor 2 zwischen flüssigem Zustand (λ_{liquid}) und festem Zustand (λ_{solid}) variieren, wobei Flüssigkeiten im Allgemeinen geringere Wärmeleitfähigkeiten aufweisen. Für die Wärmeleitfähigkeit im festen und im flüssigen Zustand wird aufgrund der geringen Temperaturabhängigkeit ein einheitlicher Wert angenommen. Aufgrund des vorliegenden kontinuierlichen Phasenübergangs ist davon auszugehen, dass im Bereich der Phasenumwandlung Lambda eine Funktion der Temperatur $\lambda_{\text{latent}}(\theta)$ ist.

$$\theta < \theta_1: \quad \lambda(\theta) = \lambda_{\text{solid}} \quad [4-26a]$$

$$\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2: \quad \lambda(\theta) = \lambda_{\text{latent}}(\theta) \quad [4-26b]$$

$$\theta > \theta_2: \quad \lambda(\theta) = \lambda_{\text{liquid}} \quad [4-26c]$$

Die Wärmeleitfähigkeit im Phasenübergangsbereich kann anteilig des Latentwärmeumsatzes des PCM ausgedrückt werden:

$$\lambda_{\text{latent}}(\theta) = \left(1 - \frac{\int_{\theta_1}^{\theta} c_{\text{latent}}(\theta) d\theta}{\int_{\theta_1}^{\theta_2} c_{\text{latent}}(\theta) d\theta} \right) \cdot \lambda_{\text{solid}} + \frac{\int_{\theta_1}^{\theta} c_{\text{latent}}(\theta) d\theta}{\int_{\theta_1}^{\theta_2} c_{\text{latent}}(\theta) d\theta} \cdot \lambda_{\text{liquid}} \quad [4-27]$$

Unter Annahme einer temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit gelten die Berechnungsgleichungen aus Kap. 4.2.1 nicht mehr und es muss auf die allgemeine Fourier'sche Wärmeleitungsgleichung (Gl. 4-1) zurückgegriffen werden. Auf die Gleichung des Wärmetransports im Bauteilinneren bei variabler Wärmeleitfähigkeit wird die Produktregel angewandt.

$$\rho \cdot \frac{\partial(c \cdot \theta)}{\partial t} = \frac{\partial \lambda}{\partial x} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} + \lambda \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad [4-28]$$

In der numerischen Umsetzung in einem expliziten Finite-Differenzen-Verfahren wurde λ diskretisiert zu λ_{n-1}^s , λ_n^s , λ_{n+1}^s .

Da die Temperaturen des Zeitschritts s an der Stelle $n-1$, n , $n+1$ bekannt sind, lassen sich im Temperaturbereich des Phasenübergangs die Werte für die Wärmeleitfähigkeiten an der jeweiligen Stelle explizit gemäß Gl. 4-26b und 4-27 berechnen.

Die Wärmeleitungsgleichung mit temperaturabhängiger Wärmeleitfähigkeit lautet unter Verwendung einer einfachen Differenz zur Darstellung der örtlichen Ableitung für ein homogenes Bauteil (hier: Schicht 1) wie folgt:

$$\rho_1 \cdot c_1 \cdot \left[\frac{\theta_n^{s+1}}{\Delta t} - \frac{\theta_n^s}{\Delta t} \right] = \lambda_{1n}^s \cdot \frac{\theta_{n-1}^s - \theta_n^s}{\Delta x_1^2} - \lambda_{1n}^s \cdot \frac{\theta_n^s}{\Delta x_1^2} - \lambda_{1n+1}^s \cdot \frac{\theta_n^s}{\Delta x_1^2} + \lambda_{1n+1}^s \cdot \frac{\theta_{n+1}^s}{\Delta x_1^2} \quad [4-29a]$$

Die Diskretisierung kann auch als zentrale Differenz durchgeführt werden:

$$\rho_1 \cdot c_1 \cdot \left[\frac{\theta_n^{s+1}}{\Delta t} - \frac{\theta_n^s}{\Delta t} \right] = \theta_{n-1}^s \cdot \left(\frac{\lambda_{1n-1}^s}{4 \cdot \Delta x_1^2} - \frac{\lambda_{1n+1}^s}{4 \cdot \Delta x_1^2} + \frac{\lambda_{1n}^s}{\Delta x_1^2} \right) + \theta_n^s \cdot \left(-2 \cdot \frac{\lambda_{1n}^s}{\Delta x_1^2} \right) + \theta_{n+1}^s \cdot \left(-\frac{\lambda_{1n-1}^s}{4 \cdot \Delta x_1^2} + \frac{\lambda_{1n+1}^s}{4 \cdot \Delta x_1^2} - \frac{\lambda_{1n}^s}{\Delta x_1^2} \right) \quad [4-29b]$$

Die Gleichungen für Rand- und Grenzpunkte ergeben sich analog.

Oberflächenpunkt mit konvektivem Wärmeübergang:

$$\rho_1 \cdot c_1 \cdot \left[\frac{\theta_n^{s+1}}{\Delta t} - \frac{\theta_n^s}{\Delta t} \right] \cdot \frac{\Delta x_1}{2} = h \cdot (\theta_L - \theta_n^s) + \frac{\lambda_{1n}^s - \lambda_{1n+1}^s}{\Delta x_1} \cdot \frac{(\theta_n^s - \theta_{n+1}^s)}{\Delta x_1} - \frac{\lambda_{1n}^s}{\Delta x_1} (\theta_n^s - \theta_{n+1}^s) \quad [4-30]$$

Grenzpunkt zweier Schichten:

$$\frac{\rho_1 \cdot c_1 \cdot \Delta x_1}{2} + \frac{\rho_2 \cdot c_2 \cdot \Delta x_2}{2} \cdot \left[\frac{\theta_n^{s+1}}{\Delta t} - \frac{\theta_n^s}{\Delta t} \right] = \frac{\lambda_{1n-1}^s - \lambda_{1n}^s}{\Delta x_1} \cdot \frac{(\theta_{n-1}^s - \theta_n^s)}{\Delta x_1} + \frac{\lambda_{1n}^s}{\Delta x_1} (\theta_{n-1}^s - \theta_n^s) - \frac{\lambda_{2n}^s - \lambda_{2n+1}^s}{\Delta x_2} \cdot \frac{(\theta_n^s - \theta_{n+1}^s)}{\Delta x_2} - \frac{\lambda_{2n}^s}{\Delta x_2} (\theta_n^s - \theta_{n+1}^s) \quad [4-31]$$

Adiabatischer Abschluss (hier Schicht 2):

$$\rho_2 \cdot c_2 \cdot \left[\frac{\theta_n^{s+1}}{\Delta t} - \frac{\theta_n^s}{\Delta t} \right] \cdot \frac{\Delta x_2}{2} = \frac{\lambda_{2n-1}^s - \lambda_{2n}^s}{\Delta x_2} \cdot \frac{(\theta_{n-1}^s - \theta_n^s)}{\Delta x_2} + \frac{\lambda_{2n}^s}{\Delta x_2} (\theta_{n-1}^s - \theta_n^s) \quad [4-32]$$

Die Ableitung der Wärmeleitfähigkeit nach dem Ort führt im Temperaturbereich $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$ zu einer Verzögerung ($\lambda_{\text{liquid}} < \lambda_{\text{solid}}$) bzw. Beschleunigung ($\lambda_{\text{liquid}} > \lambda_{\text{solid}}$) des Phasenübergangs.

4.2.4 Stabilität und Abbruchfehler

Um die Stabilität des Finite-Differenzen-Verfahren gemäß Gl. 4-21 zu sichern, sollte für die Fourier-Zahl F_o (Gl. 4-20) die Bedingung aus Gl. 4-33 erfüllt werden [88, 89].

$$Fo < \frac{1}{4 \cdot (1 - \gamma)} \quad [4-33]$$

Das explizite Finite-Differenzen-Verfahren (Implizitheitsgrad gemäß Gl. 4-20a: $\gamma = 0$) erfordert daher kleine Zeitschrittweiten und ist nur für die Betrachtung separater Teilprobleme wie z.B. dem exakten Temperaturprofil in einem PCM-Bauteil geeignet. Für die in Kap. 5 vorgestellten Ergebnisse wurden hauptsächlich Zeitschrittweiten zwischen 1 s und 60 s gewählt.

Die Ordnung n des Abbruchfehlers $O(x^n)$ besagt, dass der Absolutbetrag des Approximationsfehlers kleiner als eine Konstante mal x^n ist, für x hinreichend nahe bei Null. Im expliziten Modell wird für die Approximation der ersten Ableitung der Temperatur nach der Zeit eine Vorwärtsdifferenz gewählt. Der Abbruchfehler entspricht dem Restglied der Taylor-Entwicklung für $\theta_{(t+\Delta t)}$ nach dem linearen Glied.

$$\theta_{(t+\Delta t)} = \theta_{(t)} + \Delta t \cdot \frac{\partial \theta_{(t)}}{\partial t} + \frac{\Delta t^2}{2} \cdot \frac{\partial^2 \theta_{(t)}}{\partial t^2} + \frac{\Delta t^3}{6} \cdot \frac{\partial^3 \theta_{(\tau)}}{\partial \tau^3} \quad \text{mit } t \leq \tau \leq t + \Delta t \quad [4-34a]$$

$$\frac{\partial \theta(t)}{\partial t} = \frac{\theta_{(t+\Delta t)} - \theta_{(t)}}{\Delta t} + O(\Delta t) \quad \text{für } \Delta t \rightarrow 0 \quad [4-34b]$$

Der Abbruchfehler für die erste Ableitung nach dem Ort im Falle der Diskretisierung der Wärmeleitfähigkeit kann durch ein zentrales Differenzensystem wie in Gl. 4-29b minimiert werden.

$$\theta_{(x+\Delta x)} = \theta_{(x)} + \Delta x \cdot \dot{\theta}_{(x)} + \frac{\Delta x^2}{2} \cdot \frac{\partial^2 \theta_{(x)}}{\partial x^2} + \frac{\Delta x^3}{6} \cdot \frac{\partial^3 \theta_{(x)}}{\partial x^3} + \frac{\Delta x^4}{24} \cdot \frac{\partial^4 \theta_{(\xi)}}{\partial \xi^4} \quad \text{mit } x \leq \xi \leq x + \Delta x \quad [4-35a]$$

$$\theta_{(x-\Delta x)} = \theta_{(x)} - \Delta x \cdot \dot{\theta}_{(x)} + \frac{\Delta x^2}{2} \cdot \frac{\partial^2 \theta_{(x)}}{\partial x^2} - \frac{\Delta x^3}{6} \cdot \frac{\partial^3 \theta_{(x)}}{\partial x^3} + \frac{\Delta x^4}{24} \cdot \frac{\partial^4 \theta_{(\xi)}}{\partial \xi^4} \quad \text{mit } x \leq \xi \leq x + \Delta x \quad [4-35b]$$

$$\theta_{(x+\Delta x)} - \theta_{(x-\Delta x)} = 2 \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial \theta_{(x)}}{\partial x} + \frac{\Delta x^3}{3} \cdot \frac{\partial^3 \theta_{(x)}}{\partial x^3} \quad \frac{\partial \theta_{(x)}}{\partial x} = \frac{\theta_{(x+\Delta x)} - \theta_{(x-\Delta x)}}{2 \cdot \Delta x} + O(\Delta x^2) \quad \text{für } \Delta x \rightarrow 0 \quad [4-35c]$$

Die Bedeutung des Abbruchfehlers wurde im Vergleich des expliziten Modells mit demselben Modell im Gebäudesimulationsprogramm ESP-r evaluiert (s. Kap. 6-2). ESP-r verwendet ein Crank-Nicholson-System, dessen Abbruchfehler der Ordnung $O(x^4)$ ist. Für die Temperaturprofile ohne PCM (Abb. 4-7) ist die Übereinstimmung sehr gut, für die Temperaturprofile mit PCM (Abb. 4-8) ergeben sich leichte Abweichungen. Dennoch ist der Fehler, der durch ein explizites Vorwärts-Differenzen-Verfahren gemacht wird, für die Problemstellung akzeptabel, da die Temperaturabweichung geringer als 0.2 K ist.

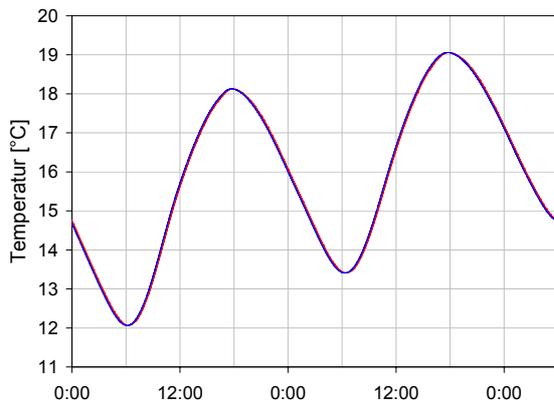


Abb. 4-7: Temperaturverlauf ohne PCM

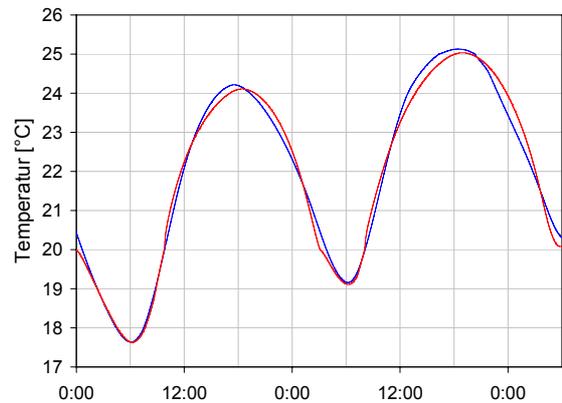


Abb. 4-8: Temperaturverlauf mit PCM

Temperaturverlauf in einem 10 cm dicken PCM-Bauteil an der Stelle $x = 5 \text{ cm}$

Blau: Berechnung mit Gebäudesimulationsprogramm, $\gamma = 0.5$, $\Delta t = 60 \text{ s}$

Rot: Berechnung mit explizitem Modell, $\gamma = 0$, $\Delta t = 1 \text{ s}$

4.2.5 Behandlung der Unterkühlung

Die numerische Behandlung der Unterkühlung basiert auf dem in Kap. 4.2.1 und Kap. 4.2.2 vorgestellten Finite-Differenzen-Verfahren. Bei einer unterkühlten Phasenumwandlung kann das Enthalpieniveau des PCM nicht mehr nur anhand der Temperatur des Materials bestimmt werden, sondern es muss zusätzlich der zeitliche Temperaturverlauf vor dem betrachteten Zeitpunkt bekannt sein. Diese Historie bestimmt den Zustand des PCM und den Grad der Umwandlung fest \leftrightarrow flüssig.

Beim unterkühlten Erstarren muss von der Annahme einer symmetrischen Funktion $c_{\text{latent}}(\theta)$ abgewichen werden. Die Temperaturgrenzen der unterkühlten Funktion $c_{\text{latent_sub}}(\theta)$ werden gemäß Gl. 4-36 definiert, wobei sub die Temperaturdifferenz zwischen nicht unterkühlter Erstarrungstemperatur θ_2 und unterkühlter Erstarrungstemperatur θ_{2_sub} darstellt:

$$\theta_{2_sub} = \theta_2 - \text{sub} \quad [4-36a]$$

$$\theta_{1_sub} = \theta_1 - \text{sub} \quad [4-36b]$$

Es gilt somit für die unterkühlte Erstarrung:

$$\theta < \theta_{1_sub}: \quad c(\theta) = c_{\text{solid}} \quad [4-37a]$$

$$\theta_{1_sub} \leq \theta \leq \theta_{2_sub}: \quad c(\theta) = c_{\text{solid}} + c_{\text{latent_sub}}(\theta) \quad [4-37b]$$

$$\theta > \theta_{2_sub}: \quad c(\theta) = c_{\text{liquid}} \quad [4-37c]$$

Der qualitative Verlauf des Phasenübergangs beim unterkühlten Erstarren wird als nicht abweichend vom nicht unterkühlten Phasenübergang betrachtet. D. h. die Approximationen gemäß Gl. 3-19 und 3-23 können für $c_{\text{latent_sub}}(\theta)$ gleichermaßen verwendet werden.

Um bei nicht symmetrischen Phasenübergängen innerhalb eines Aufwärmvorgangs bzw. eines Abkühlvorgangs nur maximal die spezifische Latentwärme l des Materials umzusetzen, müssen die Funktionen $c_{\text{latent_sub}}(\theta)$ und $c_{\text{latent_sub}}(\theta)$ mit einem Faktor multipliziert werden, der für unterschiedliche Fälle unter Berücksichtigung des Schmelzgrades h berechnet werden muss. Die detaillierte Umsetzung im numerischen Modell inklusive der nötigen Fallunterscheidungen ist in Anhang 4 zu finden.

5 Temperaturprofile ein- und zweischichtiger Wandaufbauten

Die Betrachtung der sich in PCM-Schichten einstellenden Temperaturprofile erlaubt eine qualitative Beurteilung der Effizienz von latentwärmespeichernden Materialien beim Einsatz im Innenraum. Die Wärmeleitungs- und Wärmespeicherungsprozesse in der PCM-Schicht sowie der Wärmeübergang an der Grenzschicht zur Raumluft bestimmen die Oberflächentemperaturen. Diese sind für die Nutzung von PCM zur Erhöhung der thermischen Behaglichkeit im Raum von besonderer Bedeutung, da sie maßgeblich die empfundene Temperatur beeinflussen.

Die Variation einzelner Parameter ermöglicht Aussagen über Optimierungsmöglichkeiten und optimale Anwendungsgebiete. Kapitel 5 untersucht den Einfluss von

- Temperaturleitfähigkeit
- spezifischer Schmelzwärme
- Temperatur des Phasenübergangs
- Unterkühlung
- Wärmeübergang
- thermischen Randbedingungen
- PCM-Schichtdicken

Die Temperaturprofile wurden mit dem in Kap. 4.2 vorgestellten numerischen Modell berechnet. Die raumlufseitigen Randbedingungen sind an der Stelle $x = 0$ der durch den Wärmeübergangskoeffizienten h bestimmte Wärmeübergang zur Raumluft. An der Stelle $x = d$ werden verschiedene Randbedingungen untersucht: Adiabatischer Abschluss, Wärmeleitung zu einem opaken Bauteil und Wärmeübergang zur Außenluft. Für anschließende Bauteile mit geringer Wärmeleitfähigkeit, wie z. B. Mineralwolle-Dämmung ist die Annäherung über einen adiabatischen Abschluss sowohl zur qualitativen wie auch zur quantitativen Betrachtung ausreichend.

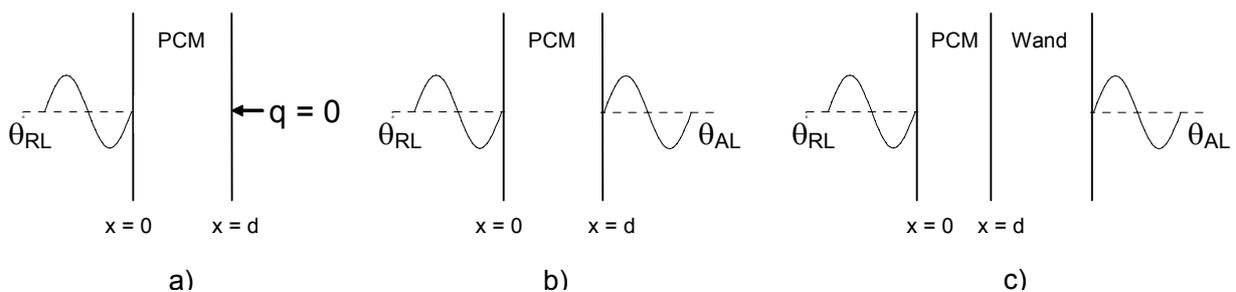


Abb. 5-1: Randbedingungen der berechneten Temperaturprofile in einem PCM-Bauteil

Linke Randbedingung $x = 0$:

Wärmeübergang zur Raumluft $q = h \cdot (\theta_{RL} - \theta_{OF})$

Rechte Randbedingung $x = d$:

a: adiabatischer Abschluss, b: Wärmeübergang zur Außenluft, c: Wärmeleitung zur Wand

Die Raumlufitemperatur θ_{RL} wird, ebenso wie die Außenlufttemperatur, als Sinusschwingung mit einer Periode von 24 h dargestellt.

$$\theta_{RL} = \bar{\theta}_{RL} + A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{24h} \cdot t\right) \quad [\text{Gl. 5-1a}]$$

$$\theta_{AL} = \bar{\theta}_{AL} + A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{24h} \cdot t\right) \quad [\text{Gl. 5-1b}]$$

5.1 Qualitative Betrachtung des Temperaturverlaufs in PCM-Bauteilen

Obwohl die realen Verhältnisse sowohl im Innenraum wie auch für die Außenluft von der Annahme einer reinen und regelmäßigen Sinusschwingung abweichen, ist die Untersuchung von Temperaturprofilen unter periodischen Randbedingungen interessant, um Aussagen über das qualitative Verhalten von Phasenübergangsmaterialien zu treffen. Um den veränderlichen Verhältnissen im Raum Rechnung zu tragen, wurden die angenommenen Randbedingungen im Hinblick auf die Mitteltemperaturen und die auftretenden Amplituden variiert.

5.1.1 Oberflächentemperaturen

Abb. 5-2 und 5-3 zeigen Oberflächentemperaturen verschiedener Putzdicken eines PCM-Putzes mit einer spezifischen Latentwärme von $l = 25 \text{ kJ/kg}$ (Abkürzung: PCM 25) bzw. $l = 50 \text{ kJ/kg}$ (Abkürzung: PCM 50) in einem Temperaturbereich zwischen $\theta_1 = 23^\circ\text{C}$ und $\theta_2 = 24^\circ\text{C}$. In diesem Temperaturbereich wird die Funktion für die latente Wärmekapazität als Rechteckfunktion dargestellt:

$$c_{\text{latent}} = 25 \text{ kJ/kgK bzw. } 50 \text{ kJ/kgK} \quad \text{für } 23^\circ\text{C} \leq \theta \leq 24^\circ\text{C}$$

Die Gesamtwärmekapazität entspricht Gl. 3-11 b: $c(\theta) = c_{\text{latent}} + c_{\text{solid}}$ im Phasenübergangsbereich $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$. An der Stelle $x = 0$ wurde ein Wärmeübergangskoeffizient von $h = 7.69 \text{ W/mK}$ (DIN 4108) angenommen. An der Stelle $x = d$ ist das Bauteil adiabatisch abgeschlossen (s. Abb. 5-1a).

Die Amplitude kann im Fall des PCM 25 erst mit einer 3 cm dicken Schicht signifikant gedämpft werden. Bei einem PCM 50 reicht bereits eine 2 cm dicke Schicht aus, um die Oberflächentemperatur beträchtlich zu senken. Während eine Erhöhung der Schichtdicke auf 3 cm und 4 cm bei einem PCM 50 keine Verbesserung bezüglich der Tagestemperaturen bringt, nimmt die während der Nachtzeit auftretende Oberflächentemperatur mit zunehmender Schichtdicke zu, da die Erstarrung des PCM im Bauteil länger dauert.

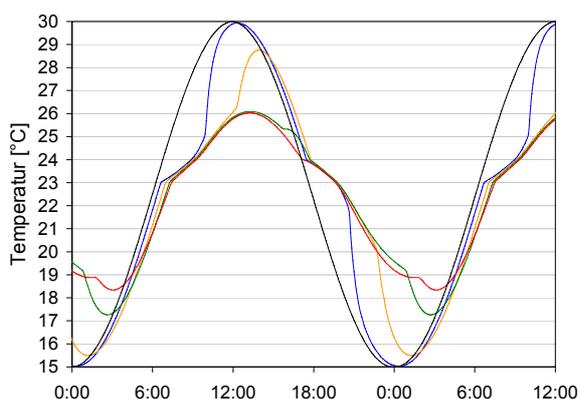


Abb. 5-2: Oberflächentemperaturen eines PCM 25

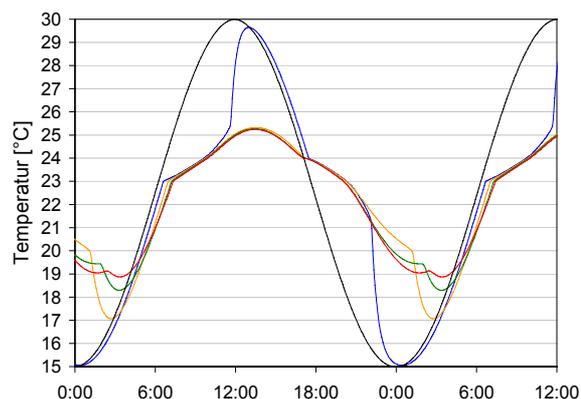


Abb. 5-3: Oberflächentemperaturen eines PCM 50

Schwarz: Raumtemperatur, Blau: 1 cm PCM, Orange: 2 cm PCM, Grün: 3 cm PCM, Rot: 4 cm PCM

5.1.2 Temperaturprofile

Die Temperaturprofile in Abb. 5-4 und 5-5 erklären die gezeigten Oberflächentemperaturverläufe. Während im Fall der 2 cm dicken Schicht bereits zum Zeitpunkt der maximalen Raumtemperatur das gesamte PCM-Bauteil den Phasenübergangsbereich von $23^\circ\text{C} - 24^\circ\text{C}$ überschritten hat, tritt dieser

Effekt bei einer 3 cm dicken Schicht erst zu einem Zeitpunkt ein, an dem die Raumlufttemperatur wieder abfällt. Zu diesem Zeitpunkt kühlen die oberflächennahen Schichten bereits ab.

Wenn das gesamte PCM-Bauteil wie in Abb. 5-4 den Schmelzprozess zu schnell durchläuft, steigt die Temperatur des flüssigen PCM, bedingt durch den hohen Wärmeübergang, aufgrund der Temperaturdifferenz $\theta_{RL} - \theta_{PCM}$ sehr stark an. Befinden sich die tieferen Schichten dagegen noch im Phasenübergangsprozess wie in Abb. 5-5, wird der Anstieg der Oberflächentemperatur durch die Wärmeleitung zwischen der Oberfläche und den sich auf einem niedrigeren Temperaturniveau befindlichen Schichten gedämpft.

Als ideal angesehen werden kann ein Temperaturverlauf im PCM-Bauteil, bei dem die gesamte PCM-Schicht während des Tages aufgeschmolzen wird, und die tieferen Schichten genau dann die Temperatur θ_2 überschreiten, wenn die Raumluft auf die Temperatur des PCM-Bauteils sinkt.

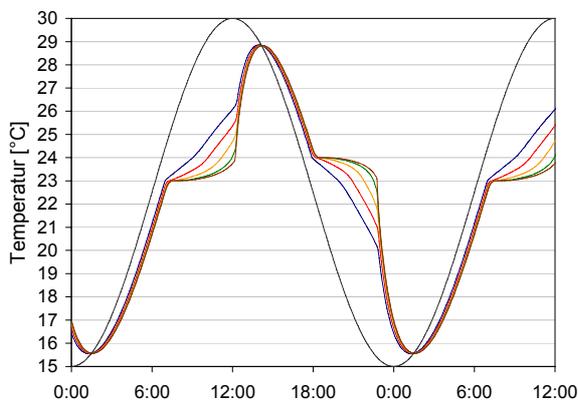


Abb. 5-4 : Temperaturprofil eines PCM 25 mit $d = 2$ cm

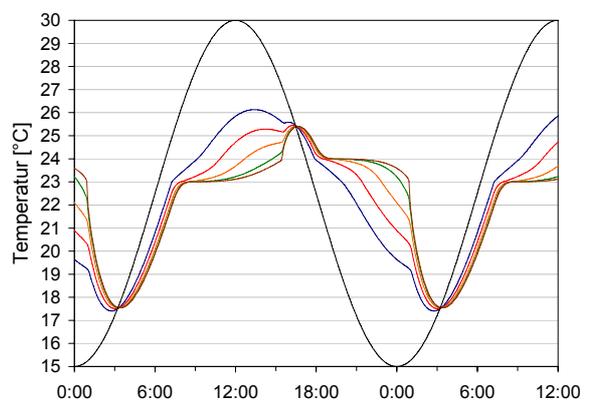


Abb. 5-5: Temperaturprofil eines PCM 25 mit $d = 3$ cm

Schwarz: Raumtemperatur, Blau: Oberflächentemperatur, Rot: $0.25 \cdot d$, Orange: $0.5 \cdot d$, Grün: $0.75 \cdot d$, Braun: d

Ein idealer Temperaturverlauf ist in Abb. 5-6 zu sehen. Alle betrachteten Schichten durchlaufen den Phasenübergangsbereich komplett. Bei einer relativ geringen Schichtdicke wird das gesamte Wärmespeicherungspotential des PCM-Bauteils genutzt. Die Oberflächenamplitudendämpfung, die mit einer 2 cm dicken Schicht eines PCM 50 erzielt werden kann, ist höher als diejenige, die mit einer 10 cm dicken Schicht eines PCM 25 erreicht wird. Abb. 5-7 zeigt, dass die tieferen Schichten des PCM-Bauteils nicht genutzt werden können. Bereits an der Stelle $x = 2.5$ cm (rote Linie) wird der Phasenübergang nur noch teilweise durchlaufen. Die maximal mögliche Oberflächenamplitudendämpfung wird also vorrangig durch die spezifische Latentwärme bestimmt.

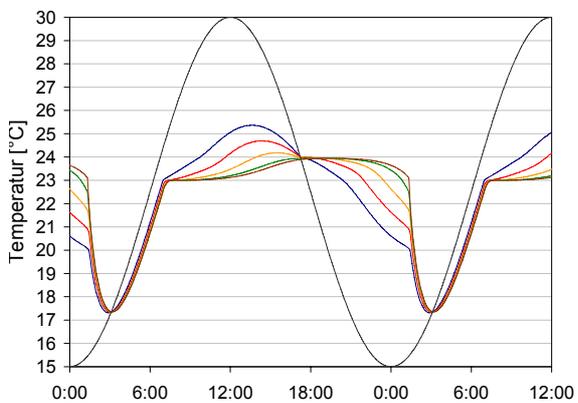


Abb. 5-6 : Temperaturprofil eines PCM 50 mit $d = 2$ cm

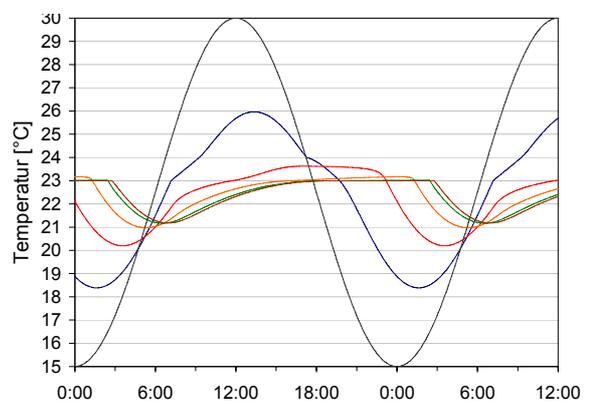


Abb. 5-7: Temperaturprofil eines PCM 25 mit $d = 10$ cm

Schwarz: Raumtemperatur, Blau: Oberflächentemperatur, Rot: $0.25 \cdot d$, Orange: $0.5 \cdot d$, Grün: $0.75 \cdot d$, Braun: d

5.2 Quantitative Beurteilungskriterien

Um die Temperaturprofile nicht nur qualitativ auszuwerten sondern auch quantitativ beurteilen zu können, wurden drei Beurteilungskriterien entwickelt.

- OF-TAV: Die Reduktion der Oberflächentemperatur dargestellt durch die dimensionslose Größe des im Folgenden Oberflächen-Temperaturamplitudenverhältnis (OF-TAV) genannten Verhältnisses von maximaler Oberflächentemperatur zu maximaler Lufttemperatur
- Effektive Wärme: Die während der wärmsten Stunden im Raum effektiv abgeführte Wärmemenge Q_{eff} (eff: effektiv), die die Effekte der Phasenverschiebung φ_{OF} zwischen der Oberflächenamplitude und der Amplitude der Lufttemperatur berücksichtigt
- Eindringtiefe: Die Bauteiltiefe, an der der Wert der Oberflächenamplitude auf $1/e$ abgesunken ist

5.2.1 Oberflächen-Temperaturamplitudenverhältnis (OF-TAV)

Um eine Verallgemeinerung der Aussagen zu ermöglichen, wird die dimensionslose Größe des Oberflächen-Temperaturamplitudenverhältnis (OF-TAV) eingeführt, die das Verhältnis von Oberflächenamplitude A_{OF} zu Lufttemperaturamplitude A_{LUFT} angibt.

$$\text{OF-TAV} = \frac{A_{\text{OF}}}{A_{\text{LUFT}}} \quad [5-2]$$

Grundsätzlich ist festzustellen, dass das OF-TAV nach einem relativ starken Abfall bei Erhöhung geringer PCM-Schichtdicken sich mit zunehmender Bauteildicke auf einen annähernd konstanten Wert einschwingt. Das oszillierende Verhalten des OF-TAV bei konventionellen und Phasenübergangsmaterialien wurde in [90] näher untersucht. Feststellende relative Maxima und Minima im Bereich höherer Bauteildicken sind auf die Phasenverschiebung im Bauteil zurückzuführen. Die Ausprägung dieser relativen Extremwerte ist bei den untersuchten PCM jedoch so gering, dass sie im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt werden.

Der Bereich der Schichtdicken, bei denen das OF-TAV auf einen annähernd konstanten Wert gesunken ist, wird im Folgenden „ungestörter“ Bereich genannt. Ab welcher Bauteildicke der ungestörte Bereich beginnt, hängt von der Wärmeleitfähigkeit, der spezifischen Schmelzwärme, der Schmelztemperatur, dem Wärmeübergang und der Lufttemperaturamplitude ab. Der Beginn des ungestörten Bereiches stellt für die jeweilige Randbedingung den Idealfall dar.

5.2.2 Effektive Wärme

Ob der Beginn des ungestörten Bereiches tatsächlich das Ende einer sinnvollen Erhöhung der PCM-Bauteildicke manifestiert, wird mit der Berechnung der effektiven Wärme überprüft. Hierbei wird die zeitliche Komponente des Oberflächen-Temperaturverlaufes ebenso berücksichtigt wie eine Vorzeichenänderung der Temperaturdifferenz $\theta_{\text{RL}} - \theta_{\text{OF}}$ in dem betrachteten Zeitraum. Dies geschieht, indem über die gesamte Fläche zwischen Lufttemperatur und Oberflächentemperatur während eines bestimmten Zeitraumes unabhängig vom Vorzeichen des Temperaturgradienten integriert wird. Für einen Einsatz von PCM zur Reduktion der Raumlufttemperaturen sind die Stunden der maximalen Lufttemperatur von Interesse. Der Integrationszeitraum beginnt daher 4 h vor der maximalen Lufttemperatur und endet 4 h nach dem Auftreten der Lufttemperaturamplitude. Überträgt man diesen

Zeitraum von 8 h auf einen realistischen Temperaturverlauf in einem z.B. süd-orientierten Raum entspricht dies den Stunden zwischen ca. 10:00 und 18:00 Uhr bei einer angenommenen Maximaltemperatur um 14:00 Uhr. Die Multiplikation der über die Zeit integrierten Temperaturdifferenz zwischen Raumluft- und Oberflächentemperatur mit dem Wärmeübergangskoeffizienten h ergibt die über die Zeit integrierte Wärmestromdichte an der Oberfläche des Bauteils. Diese Größe auf 1 m^2 des Bauteils bezogen wird im Folgenden Q_{eff} genannt.

$$Q_{\text{eff}} = 1 \text{ m}^2 \cdot h \cdot \int_{t_{\text{ALUFT}}-4\text{h}}^{t_{\text{ALUFT}}+4\text{h}} (\theta_{\text{RL}} - \theta_{\text{OF}}) dt = 1 \text{ m}^2 \cdot \int_{t_{\text{ALUFT}}-4\text{h}}^{t_{\text{ALUFT}}+4\text{h}} q_{|\text{OF}} dt \quad [5-3]$$

5.2.3 Eindringtiefe

Als Eindringtiefe wird hier diejenige Tiefe bezeichnet, an der die Amplitude der Temperaturschwingung im Bauteil auf $1/e$ der Oberflächenamplitude abgesunken ist. In manchen Literaturstellen wird die Eindringtiefe auch als effektive Dicke bezeichnet [88]. Die Eindringtiefe hängt im Fall von konventionellen, nicht phasenwechselnden Materialien nur von der Temperaturleitfähigkeit und der Periodendauer ab:

$$d^* = \sqrt{\frac{a \cdot t_0}{\pi}} \quad [5-4]$$

Für PCM ist die Eindringtiefe auch eine Funktion der Lufttemperaturamplitude und des Temperaturbereichs des Phasenübergangs. Für die Bestimmung der Eindringtiefe von PCM mit kontinuierlichem Phasenübergang werden numerische Verfahren benötigt. Die Eindringtiefe wird numerisch berechnet bei einer örtlichen Diskretisierung von 1 mm und unter Kenntnis der Oberflächenamplitude.

5.3 Variation der Temperaturleitfähigkeit

Im Folgenden werden PCM unterschiedlicher Temperaturleitfähigkeit betrachtet. Eine mögliche Variation der Temperaturleitfähigkeit setzt sich aus den Größen Wärmeleitfähigkeit, Rohdichte und spezifische Wärmekapazität zusammen. Da im Falle des PCM-Putzes nicht von einer Rohdichteänderung auszugehen ist, liegt eine mögliche materialtechnische Optimierung hauptsächlich im Bereich der Wärmeleitfähigkeit.

5.3.1 Wärmeleitfähigkeit – konstante Werte

Eine Optimierung des realen PCM-Putzes im Hinblick auf die Wärmeleitfähigkeit ist aufgrund der Massenverhältnisse PCM/Putz (ca. 20 Massenprozent PCM) und der Matrixstruktur des Putzes nur über die Veränderung der Wärmeleitfähigkeit der nicht latentwärmespeichernden Bestandteile sinnvoll. Da die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit bei konventionellen, nicht phasenwechselnden Materialien im betrachteten Temperaturbereich gering ist, differieren die im Folgenden gewählten Werte für die Wärmeleitfähigkeit im flüssigen Zustand nicht von den Werten im festen Zustand. Um Aussagen über mögliche Einflussfaktoren zu erhalten, wurde bei den thermischen Konstanten von den Messdaten des realen Putzes (Kap. 3.3.3) zum Teil abgewichen.

Der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit wurde mit dem einschichtigen, adiabatisch abgeschlossenen expliziten Modell untersucht (Abb. 5-1a). Als raumseitiger Wärmeübergangskoeffizient wurde der

DIN-Wert für den inneren Wärmeübergang einer vertikalen Wand angenommen: $h = 7.69 \text{ W/m}^2\text{K}$. Für das Material wurden die thermischen Konstanten $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ und $c_{\text{solid}} = 1000 \text{ J/kgK}$ verwendet. Der Wert für die Wärmeleitfähigkeit des PCM wurde variiert mit $\lambda = 0.21 \text{ W/mK}$, $\lambda = 0.42 \text{ W/mK}$ und $\lambda = 0.63 \text{ W/mK}$.

Die Temperaturprofile werden im eingeschwungenen Zustand betrachtet. Die spezifische Schmelzwärme wurde variiert zu $l = 25 \text{ kJ/kg}$ (PCM 25) und $l = 50 \text{ kJ/kg}$ (PCM 50) und ist durchgängig als Rechteckfunktion im Temperaturbereich zwischen 23°C und 24°C dargestellt.

Im ungestörten Bereich ist ein gleichförmiges OF-TAV mit zunehmender Schichtdicke festzustellen. Die Reduktion ist umso größer, je höher die Wärmeleitfähigkeit des Materials ist. Das OF-TAV wird in Abb. 5-8 - 5-13 für verschiedene Werte der spezifischen Schmelzwärme und unterschiedliche äußere Randbedingungen dargestellt.

Bei geringen Lufttemperaturschwankungen ($A = 2.5 \text{ K}$) ist eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit nur bedingt sinnvoll. Das OF-TAV eines 2 cm dicken Putzes wird bei einer Verdopplung der Wärmeleitfähigkeit von 0.21 W/mK auf 0.42 W/mK um ca. 4 % - 5 % gesenkt. Dies bedeutet eine effektive Reduktion der Oberflächentemperatur um 0.1 Kelvin durch die erhöhte Wärmeleitfähigkeit. Eine weitere Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit führt zu noch geringeren absoluten Verbesserungen. Bei dem Ausgangswert der Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0.21 \text{ W/mK}$ beginnt der ungestörte Bereich unabhängig von der gewählten Latentwärme ab einer Schichtdicke von 2 cm. Eine Erhöhung der PCM-Schichtdicke auf $d > 2 \text{ cm}$ bringt bei der angenommenen geringen Raumluftamplitude keine weitere nennenswerte Reduktion der Oberflächenamplitude. Bei einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0.63 \text{ W/mK}$ beginnt der ungestörte Bereich im Falle von Abb. 5-8 ($l = 25 \text{ kJ/kg}$) bei einer Schichtdicke von 3 - 4 cm und in Abb. 5-9 ($l = 50 \text{ kJ/kg}$) bei einer Schichtdicke von 2 - 3 cm. Bei geringen Raumluftschwankungen ist der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit auf die tatsächlichen Oberflächentemperaturen eher gering. Die relative Abschwächung der Temperaturspitzen ist, unabhängig von der Wärmeleitfähigkeit, bereits bei kleinen Schichtdicken sehr gut.

Wird dieselbe Betrachtung für höhere Raumluftamplituden ($A = 5 \text{ K}$, $A = 7.5 \text{ K}$) durchgeführt (Abb. 5-10 - 5-13) ist festzustellen, dass der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Bauteildicke betrachtet werden muss. Eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit kann bei geringen Bauteildicken zu höheren Oberflächentemperaturen als beim Ausgangswert von $\lambda = 0.21 \text{ W/mK}$ und damit zu einem unerwünschten Effekt führen. Erst ab einer bestimmten Dicke unterschreiten die OF-TAV der stärker wärmeleitenden PCM die Kurven des Ausgangsstoffes. Dann tragen sie allerdings dazu bei, dass deutlich tiefere Oberflächentemperaturen erzielt werden. Die relative Verbesserung, die in diesem Fall durch eine höhere Wärmeleitfähigkeit erreicht wird, liegt im Bereich von zusätzlichen 8 % - 16 % der Lufttemperaturamplitude. Diese Verbesserung kann nur erzielt werden, wenn die Schichtdicke entsprechend hoch ist. Bei geringen Schichtdicken sind kleinere Wärmeleitfähigkeiten von Vorteil.

Eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit führt bei Raumluftamplituden von 5 bzw. 7.5 K zu einem langsameren Abfall des OF-TAV und der ungestörte Bereich wird erst bei höheren Bauteildicken erreicht (Abb. 5-10 - 5-13). Während die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit sich direkt proportional auf die Temperaturleitfähigkeit auswirkt, führt eine höhere spezifische Latentwärme im Bereich des Phasenübergangs zu einer reduzierten Temperaturleitfähigkeit. Dies wirkt sich entsprechend umgekehrt

auf das Eintreten des ungestörten Bereiches aus. Verfügt das PCM über eine höhere Schmelzenthalpie, wird die maximal nutzbare Schichtdicke früher erreicht.

Die durch die Oberflächentemperaturreduktion erzielte effektive Wärmemenge Q_{eff} , die die zeitliche Komponente der Temperaturreduktion berücksichtigt, bestätigt die empfohlenen maximalen Schichtdicken in Abhängigkeit von der Raumluftamplitude und der spezifischen Latentwärme (Anhang 5). Ab einer gewissen Schichtdicke nimmt der Anstieg von Q_{eff} deutlich ab. Für ein PCM 25 liegt diese Schichtdicke bei 2 - 4 cm und für ein PCM 50 bei 2 - 3 cm je nach Raumluftamplitude.

Eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit ist für die betrachteten PCM im Hinblick auf die Wärmespeicherkapazität sinnvoll. Um die maximal auftretenden Oberflächentemperaturen durch die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit weiter zu reduzieren, muss aber eine bestimmte Schichtdicke des PCM vorhanden sein. Je höher die Raumluftamplitude, umso sinnvoller sind dickere PCM-Schichten.

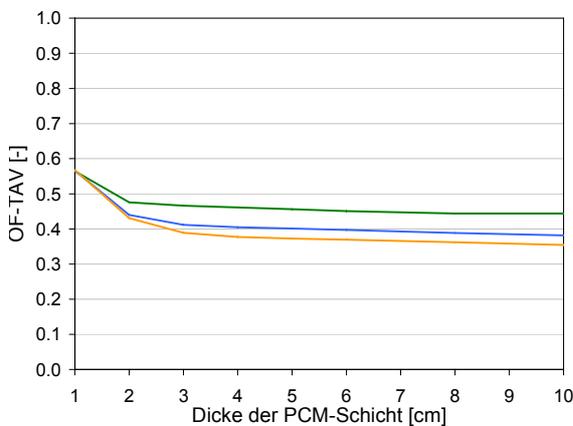


Abb. 5-8: OF-TAV eines PCM 25

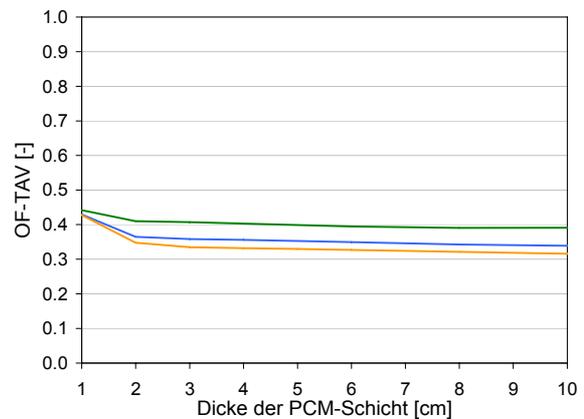


Abb. 5-9: OF-TAV eines PCM 50

Grün: $\lambda = 0.21 \text{ W/mK}$, Blau: $\lambda = 0.42 \text{ W/mK}$, Orange: $\lambda = 0.63 \text{ W/mK}$
 Lufttemperatur: $\theta_{RL} = 22.5^\circ\text{C} + 2.5 \text{ K} * \sin(2\pi/24h * t)$

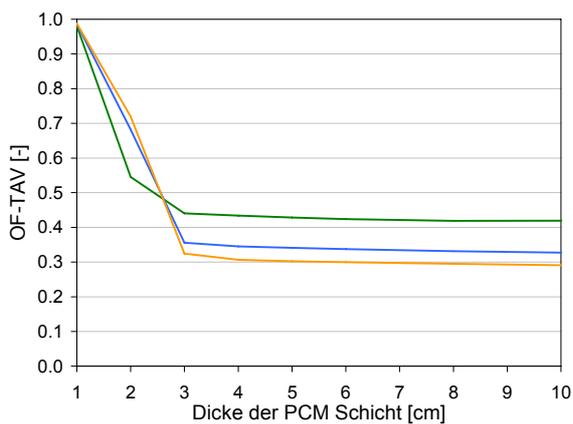


Abb. 5-10: OF-TAV eines PCM 25

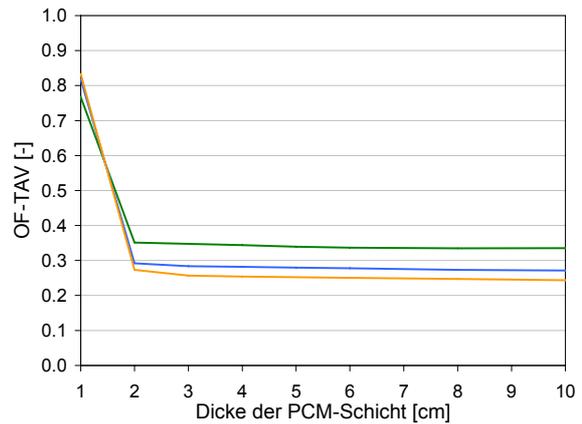


Abb. 5-11: OF-TAV eines PCM 50

Grün: $\lambda = 0.21 \text{ W/mK}$, Blau: $\lambda = 0.42 \text{ W/mK}$, Orange: $\lambda = 0.63 \text{ W/mK}$
 Lufttemperatur: $\theta_{RL} = 22.5^\circ\text{C} + 5.0 \text{ K} * \sin(2\pi/24h * t)$

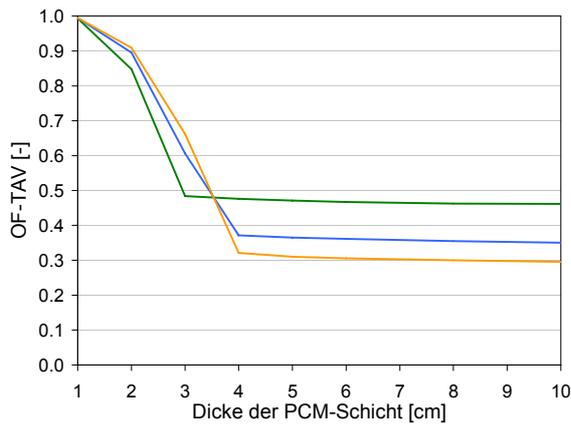


Abb. 5-12: OF-TAV eines PCM 25

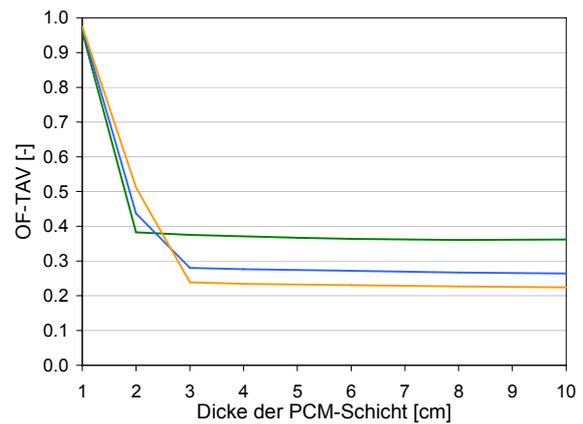


Abb. 5-13: OF-TAV eines PCM 50

Grün: $\lambda = 0.21 \text{ W/mK}$, Blau: $\lambda = 0.42 \text{ W/mK}$, Orange: $\lambda = 0.63 \text{ W/mK}$
 Lufttemperatur: $\theta_{RL} = 22.5^\circ\text{C} + 7.5 \text{ K} * \sin(2\pi/24h * t)$

5.3.2 Wärmeleitfähigkeit – variable Werte

Während die Werte für die Wärmeleitfähigkeit des PCM-Putzes im festen und flüssigen Zustand aufgrund des maßgeblichen Anteils an Gipsputz als annähernd konstant angenommen werden können, unterscheiden sie sich z.B. bei Salzhydraten oft beträchtlich. Die Wärmeleitfähigkeit des Materials während des Phasenübergangs ist a priori nicht bekannt. Eine Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit im Phasenübergangsbereich gemäß Gl. 4-27, bei der anteilig der umgesetzten Schmelzwärme ein Wert zwischen festem und flüssigem Zustand angenommen wird, ist unter der Voraussetzung eines kongruenten Schmelzprozesses naheliegend.

In Abb. 5-14 bis 5-17 werden Temperaturprofile dargestellt, die für ein PCM berechnet wurden, dessen Werte für die Wärmeleitfähigkeit zwischen $\lambda = 0.55 \text{ W/mK}$ und $\lambda = 1.1 \text{ W/mK}$ variieren. Die spezifische Latentwärme des PCM beträgt $l = 172 \text{ kJ/kg}$ (Abkürzung: PCM 172) und die Rohdichte wurde konstant mit $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ angenommen. Die Temperaturprofile wurden mit dem expliziten Modell mit adiabatischem Abschluss (Abb. 5-1a) und konstantem Wärmeübergangskoeffizienten $h = 7.69 \text{ W/m}^2\text{K}$ berechnet. Die Raumlufttemperatur wurde so gewählt, dass sich das PCM im Phasenübergang befindet. Der Phasenübergang wurde exponentiell approximiert und weist eine Peak-Temperatur von $\theta_2 = 29^\circ\text{C}$ auf. Als Ausgangswerte dienen Temperaturprofile, die mit konstanten Lambda-Werten für den festen und flüssigen Zustand berechnet wurden: $\lambda_{\text{solid}} = \lambda_{\text{liquid}} = 0.55 \text{ W/mK}$ bzw. $\lambda_{\text{solid}} = \lambda_{\text{liquid}} = 1.1 \text{ W/mK}$ (Abb. 5-19 und 5-20).

Für die Temperaturprofile bei konstanten Werten der Wärmeleitfähigkeit ist die Temperaturspreizung an der Oberfläche des PCM-Bauteils mit $\lambda = 0.55 \text{ W/mK}$ größer als beim PCM-Bauteil mit $\lambda = 1.1 \text{ W/mK}$. Aufgrund der hohen spezifischen Latentwärme wirkt sich bereits ab 2 cm PCM-Dicke eine höhere Wärmeleitfähigkeit positiv auf die Temperaturamplitude an der Oberfläche aus. Bei dem in Abb. 5-14 und Abb. 5-15 dargestellten 6 cm dicken Bauteil beträgt die Differenz der Oberflächentemperatur während des Phasenübergangs 0.4 K.

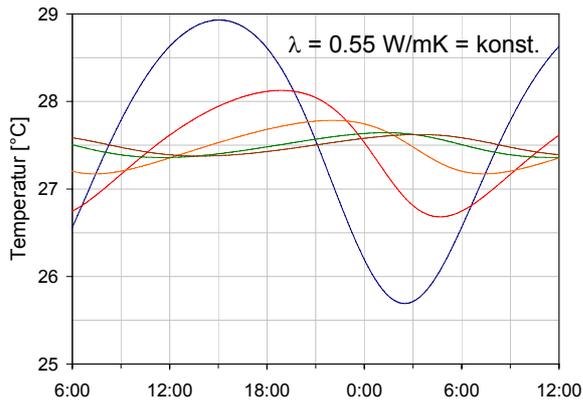


Abb. 5-14: Temperaturprofil eines PCM 172, $\theta_2 = 29^\circ\text{C}$ mit $\lambda = 0.55 \text{ W/mK} = \text{konst.}$

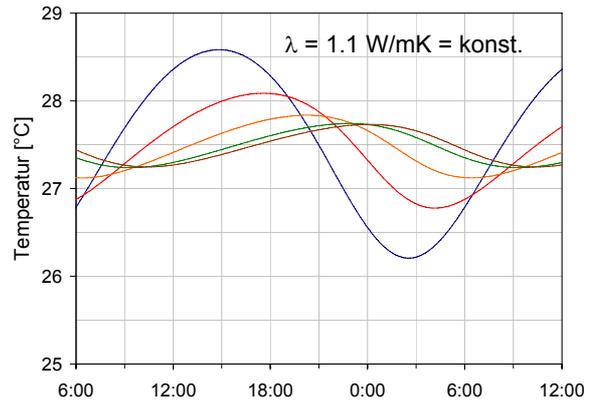


Abb. 5-15: Temperaturprofil eines PCM 172, $\theta_2 = 29^\circ\text{C}$ mit $\lambda = 1.1 \text{ W/mK} = \text{konst.}$

Blau: Oberflächentemperatur, Rot: $0.25 * d$, Orange: $0.5 * d$, Grün: $0.75 * d$, Braun: d ; $d = 6 \text{ cm}$
 Lufttemperatur: $\theta_{RL} = 27.5^\circ\text{C} + 10 \text{ K} * \sin(2\pi/24h * t)$

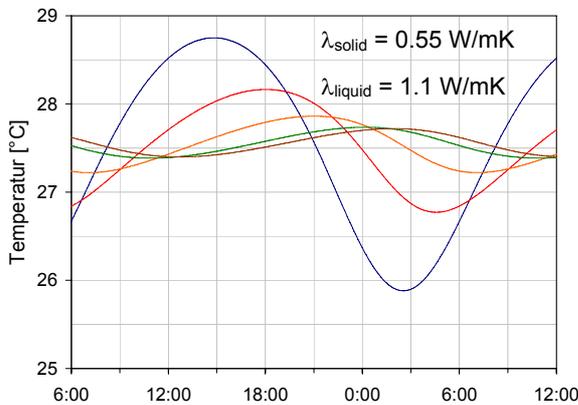


Abb. 5-16a: Temperaturprofil eines PCM 172, $\theta_2 = 29^\circ\text{C}$ mit $\lambda_{\text{solid}} = 0.55 \text{ W/mK}$, $\lambda_{\text{liquid}} = 1.1 \text{ W/mK}$

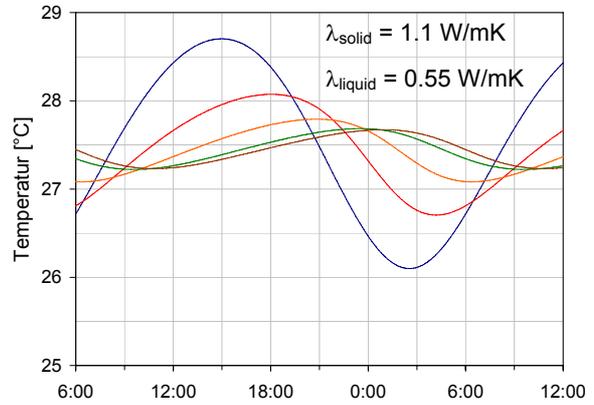


Abb. 5-17a: Temperaturprofil eines PCM 172, $\theta_2 = 29^\circ\text{C}$ mit $\lambda_{\text{solid}} = 1.1 \text{ W/mK}$, $\lambda_{\text{liquid}} = 0.55 \text{ W/mK}$

Blau: Oberflächentemperatur, Rot: $0.25 * d$, Orange: $0.5 * d$, Grün: $0.75 * d$, Braun: d ; $d = 6 \text{ cm}$
 Lufttemperatur: $\theta_{RL} = 27.5^\circ\text{C} + 10 \text{ K} * \sin(2\pi/24h * t)$

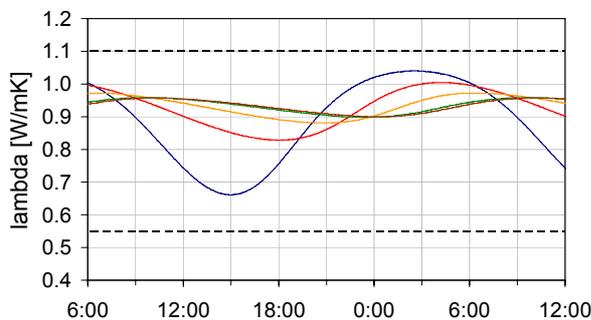


Abb. 5-16 b: Wärmeleitfähigkeit für Abb. 5-16 a mit $\lambda_{\text{solid}} = 0.55 \text{ W/mK}$, $\lambda_{\text{liquid}} = 1.1 \text{ W/mK}$

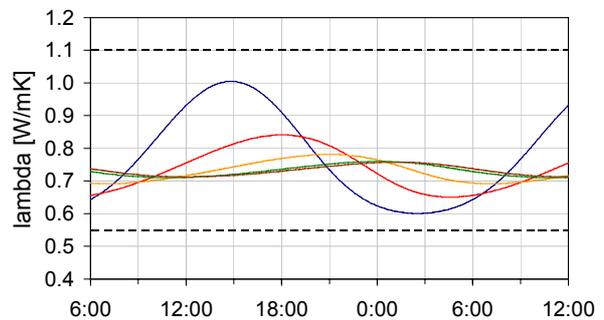


Abb. 5-17 b: Wärmeleitfähigkeit für Abb. 5-17 a mit $\lambda_{\text{solid}} = 1.1 \text{ W/mK}$, $\lambda_{\text{liquid}} = 0.55 \text{ W/mK}$

Blau: λ des OF-Knotens, Rot: λ an der Stelle $0.25 * d$, Orange: λ an der Stelle $0.5 * d$, Grün: λ an der Stelle $0.75 * d$, Braun: λ an der Stelle d ; $d = 6 \text{ cm}$

Die Auswirkungen auf die Oberflächenamplituden reduzieren sich, wenn unterschiedliche Werte für die Wärmeleitfähigkeit im festen und im flüssigen Zustand angenommen werden. Die in Abb. 5-16a und Abb. 5-17a berechneten Oberflächentemperaturen liegen jeweils im Bereich zwischen den, unter Annahme einer einheitlichen Wärmeleitfähigkeit, berechneten Temperaturen aus Abb. 5-14 und Abb. 5-15. Verlaufen die Temperaturen hauptsächlich im Temperaturbereich des Phasenübergangs, führt die Berücksichtigung der zwischen fest und flüssig variierenden Wärmeleitfähigkeit nur zu geringfügigen Unterschieden.

Werden Temperaturverläufe betrachtet, in denen das PCM-Bauteil den Bereich des Phasenübergangs teilweise über- bzw. unterschreitet (Anhang 6), folgen die Temperaturprofile mit variabler Wärmeleitfähigkeit jeweils dem Profil mit der für den betrachteten Temperaturbereich maßgeblichen konstanten Wärmeleitfähigkeit.

5.4 Maximal nutzbare Schichtdicke und Eindringtiefe

Kap. 5.3 gibt bereits deutliche Hinweise auf die maximal nutzbaren Schichtdicken. Während die Kriterien OF-TAV und Q_{eff} die Lufttemperatur und die Oberflächentemperatur betrachten, gibt die Eindringtiefe des Materials Aufschluss über die im Bauteil an einer bestimmten Stelle auftretenden Temperaturverläufe. Die Eindringtiefe gibt an, an welcher Stelle im Bauteil die Oberflächenamplitude auf $1/e$ gesunken ist. Das Verhältnis der Amplitude A_d , die unter Annahme eines adiabatischen Abchlusses an der Stelle $x = d$ im Bauteil auftritt, zur Oberflächenamplitude A_{OF} wird im Folgenden TAV* genannt:

$$TAV^* = \frac{A_d}{A_{OF}} \quad [5-5]$$

Abb. 5-18 bis 5-21 zeigen TAV* und Eindringtiefen für unterschiedliche spezifische Schmelzwärmen und Raumlufttemperaturen bei einem Phasenübergang als Rechteckfunktion zwischen $\theta_1 = 23^\circ\text{C}$ und $\theta_2 = 24^\circ\text{C}$. Die PCM-Dicken wurden in 1 cm Schritten erhöht. Die grüne Linie beschreibt die Abnahme des TAV* mit zunehmender Bauteildicke. Rot markiert ist die Linie, die ein TAV* von $1/e$ darstellt. Die Eindringtiefe ist als gestrichelte Linie aufgetragen und bezieht sich auf die Sekundärachse. Eine Erhöhung der Schichtdicke eines PCM-Bauteils über die Eindringtiefe hinaus bringt keine signifikanten Effekte, da sich die Eindringtiefe nicht weiter erhöht.

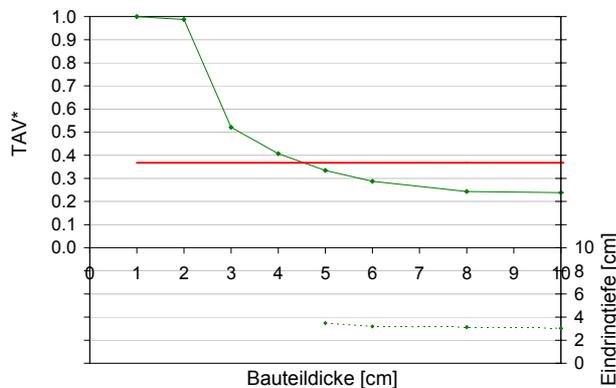


Abb. 5-18: TAV* eines PCM 25, $\lambda = 0.21 \text{ W/mK}$
 $\theta_{RL} = 22.5^\circ\text{C} + 5.0 \text{ K} * \sin(2\pi/24h * t)$

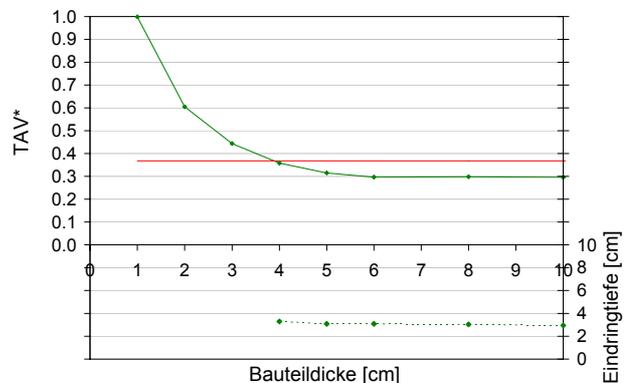


Abb. 5-19: TAV* eines PCM 50, $\lambda = 0.21 \text{ W/mK}$
 $\theta_{RL} = 22.5^\circ\text{C} + 5.0 \text{ K} * \sin(2\pi/24h * t)$

Grün (Primärachse): TAV*, Rot: $1/e$, Grün-gestrichelt (Sekundärachse): Eindringtiefe

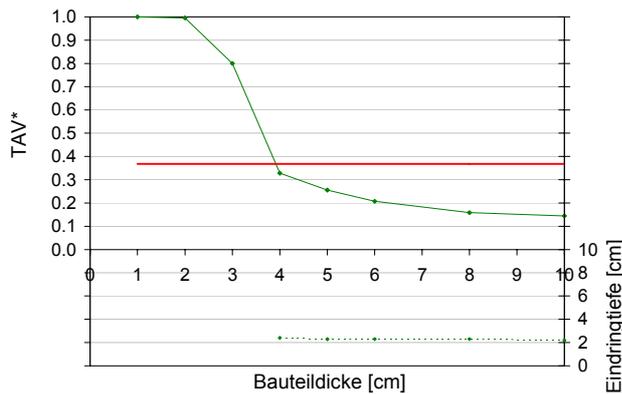


Abb. 5-20: TAV* eines PCM 25, $\lambda = 0.21 \text{ W/mK}$
 $\theta_{RL} = 22.5^\circ\text{C} + 7.5 \text{ K} * \sin(2\pi/24h * t)$

Grün (Primärachse): TAV*, Rot: $1/e$, Grün-gestrichelt (Sekundärachse): Eindringtiefe

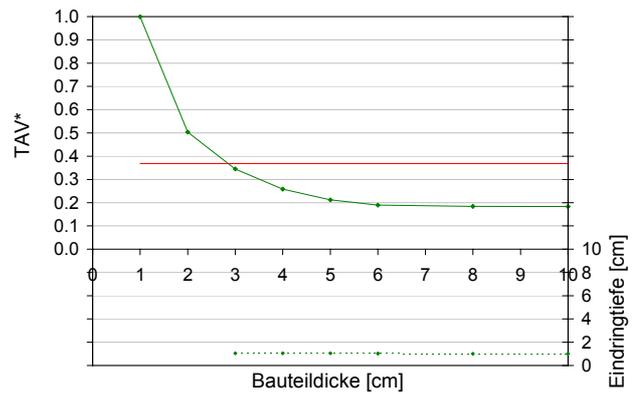


Abb. 5-21: TAV* eines PCM 50, $\lambda = 0.21 \text{ W/mK}$
 $\theta_{RL} = 22.5^\circ\text{C} + 7.5 \text{ K} * \sin(2\pi/24h * t)$

Folgende Aussagen können anhand der dargestellten Kurven getroffen und durch Vergleichsrechnungen bestätigt werden: Die Eindringtiefe ist proportional zur Temperaturleitfähigkeit und umgekehrt proportional zur Latentwärme. Der Zusammenhang zwischen d^* und a lässt sich bereits für nichtphasenwechselnde Materialien aus Gl. 5-4 entnehmen. Die im PCM stattfindende Wärmespeicherung, die an die Wärmeleitung im Bauteil gekoppelt ist, führt zu geringeren Eindringtiefen für höhere spezifische Latentwärmern.

Je höher die Lufttemperaturamplituden sind, umso geringer ist die Eindringtiefe. Bei höheren Amplituden ist die Temperaturspreizung im PCM-Bauteil größer als bei geringen Lufttemperaturschwankungen, da die Oberflächentemperatur über den Wärmeübergang an die Lufttemperatur gekoppelt ist. Der umgekehrt proportionale Einfluss der Schwankungsbreite der Lufttemperatur auf die Eindringtiefe ist insbesondere dann gegeben, wenn die Oberflächentemperatur während des Tages die Peak-Temperatur θ_2 des Phasenübergangs überschreitet, während der Rest des Bauteils den Phasenübergang nicht komplett durchläuft.

5.5 Temperatur des Phasenübergangs (Rechteck-Funktion)

Die ideale Schmelztemperatur eines PCM hängt vom Temperaturverlauf ab, der im betrachteten Raum zu erwarten ist. Um qualitative Aussagen über geeignete Schmelztemperaturen zu erhalten, wurde in Abb. 5-22 - 5-25 ein Temperaturbereich von 1 Kelvin angenommen, in dem der Phasenübergang stattfindet (gelb hinterlegt). Die Latentwärme von $l = 25 \text{ kJ/kg}$ bzw. $l = 50 \text{ kJ/kg}$ wird als Rechteckfunktion im Phasenübergangsbereich dargestellt.

Die Variation sinnvoller Phasenübergangsbereiche beginnt oberhalb der Mitteltemperatur der Raumlufttemperatur. Ein Phasenübergangsbereich unterhalb der Mitteltemperatur wirkt sich negativ auf die nötige Entladung des PCM während der Nachtstunden aus.

Wird der Phasenübergangsbereich zu hoch gewählt, kann die Wärmespeicherfähigkeit des PCM nicht ausgenutzt werden. Die Temperaturen im Bauteil durchlaufen nur teilweise den Schmelzbereich, da die Lufttemperatur bereits sinkt, bevor die tieferen PCM-Schichten aktiviert werden. In diesem Fall bringt eine Erhöhung der spezifischen Schmelzwärme von $l = 25 \text{ kJ/kg}$ auf $l = 50 \text{ kJ/kg}$ keinen Vorteil.

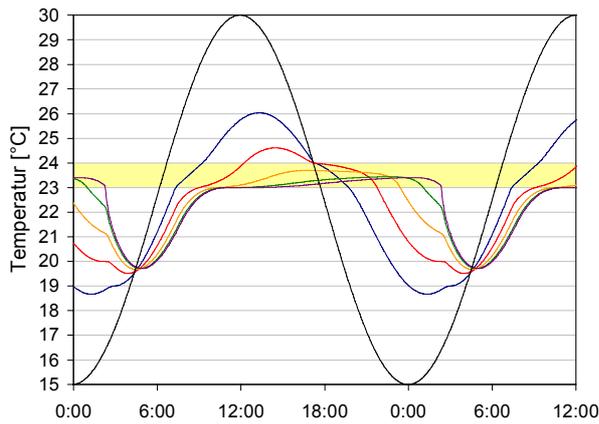


Abb. 5-22: Temperaturprofil eines PCM 25
bei $\theta_1 = 23^\circ\text{C}$, $\theta_2 = 24^\circ\text{C}$

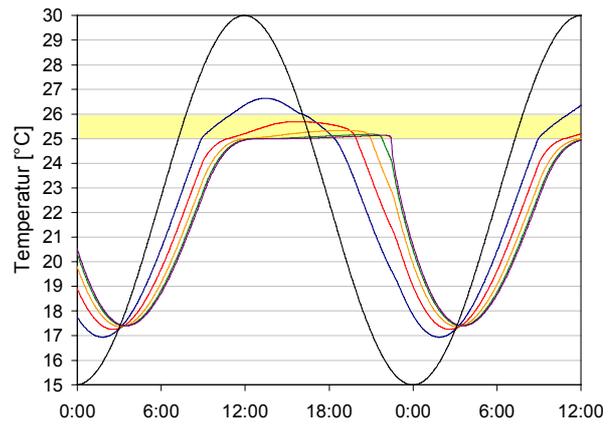


Abb. 5-23: Temperaturprofil eines PCM 25
bei $\theta_1 = 25^\circ\text{C}$, $\theta_2 = 26^\circ\text{C}$

Schwarz: Raumtemperatur, Blau: Oberflächentemperatur, Rot: $0.25 \cdot d$, Orange: $0.5 \cdot d$, Grün: $0.75 \cdot d$, Braun: d
PCM 25, $d = 5 \text{ cm}$, $\lambda = 0.21 \text{ W/mK}$

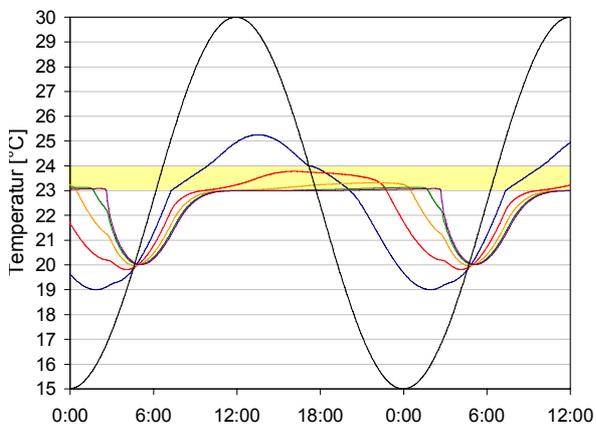


Abb. 5-24: Temperaturprofil eines PCM 50
bei $\theta_1 = 23^\circ\text{C}$, $\theta_2 = 24^\circ\text{C}$

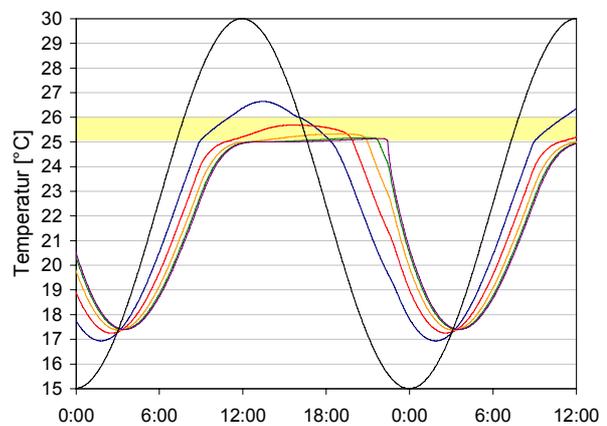


Abb. 5-25: Temperaturprofil eines PCM 50
bei $\theta_1 = 25^\circ\text{C}$, $\theta_2 = 26^\circ\text{C}$

Schwarz: Raumtemperatur, Blau: Oberflächentemperatur, Rot: $0.25 \cdot d$, Orange: $0.5 \cdot d$, Grün: $0.75 \cdot d$, Braun: d
PCM 25, $d = 5 \text{ cm}$, $\lambda = 0.21 \text{ W/mK}$

Je niedriger der Schmelzbereich des PCM liegt, umso geringere Temperaturen treten auf. Als ideal kann der Schmelzbereich dann angesehen werden, wenn die Oberflächentemperatur des Bauteils den Temperaturbereich des Phasenübergangs komplett durchläuft, während die dahinter liegenden, noch nicht komplett aufgeschmolzenen Bauteilschichten einen rapiden Anstieg der Oberflächentemperatur in der flüssigen Phase verhindern. Daher gilt auch: Je dicker die PCM-Schicht, umso niedriger sollte der Temperaturbereich des Phasenübergangs liegen.

5.6 Zweischichtige PCM-Bauteile mit kontinuierlichem Phasenübergang

Reale Bauteile wie Wände oder Decken bestehen aus mehreren Schichten und sind an beiden Oberflächen an die Lufttemperatur gekoppelt. Die hier betrachteten Bauteile bestehen aus einer PCM-Schicht, deren spezifische Latentwärme mit $l = 16.5 \text{ kJ/kg}$ (Abkürzung PCM 16.5) derjenigen des im Rahmen dieser Arbeit verwendeten PCM-Putzes (s. Kap. 3-3) entspricht. Die PCM-Schicht grenzt an eine 20 cm dicke Wärmedämmschicht mit $\lambda = 0.04 \text{ W/mK}$. Der Temperaturgang auf der Isolier-

rungsseite entspricht einem sinusförmigen Außentemperaturverlauf im Temperaturbereich von 15°C bis 30°C bei einem äußeren Wärmeübergangskoeffizienten $h_e = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ (DIN 4108). Die Raumtemperaturen schwanken um die Mitteltemperatur 25°C mit einem nächtlichen Minimum von 20.5°C und einer Tageshöchsttemperatur im Raum von 29.5°C. Die Temperaturprofile sind in Anhang 7 zu finden.

5.6.1 Variation des Phasenübergangsbereichs $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$

Die spezifische Latentwärmeumsetzung während des kontinuierlichen Phasenübergangs wurde gemäß Gl. 3-23 approximiert. Der relativ große Temperaturbereich von 10 K begrenzt die Möglichkeit zur Ausnutzung der gesamten Wärmespeicherefähigkeit der PCM. Beginnt der Phasenübergang bereits bei einer Temperatur unterhalb der im Raum anzutreffenden minimalen Lufttemperatur, kann ein gewisser Teil der im PCM vorhandenen Latentwärme nicht genutzt werden.

Der untersuchte PCM-Putz verfügt über eine durchschnittliche Schmelzenthalpie von 16.5 kJ/kg mit einem Phasenübergangsbereich zwischen 18°C und 28°C. Zur Bestimmung eines optimierten Schmelzbereichs wurde eine Variation des Phasenübergangstemperaturbereichs bei konstanter spezifischer Latentwärme und gleich bleibendem qualitativen Verlauf der temperaturabhängigen Wärmekapazität $c(\theta)$ durchgeführt. Zur Beurteilung des idealen Schmelzbereiches werden die Amplitudenreduktion an der Oberfläche, OF-TAV, die effektiv eingespeicherte Wärmemenge Q_{eff} und die Eindringtiefe betrachtet.

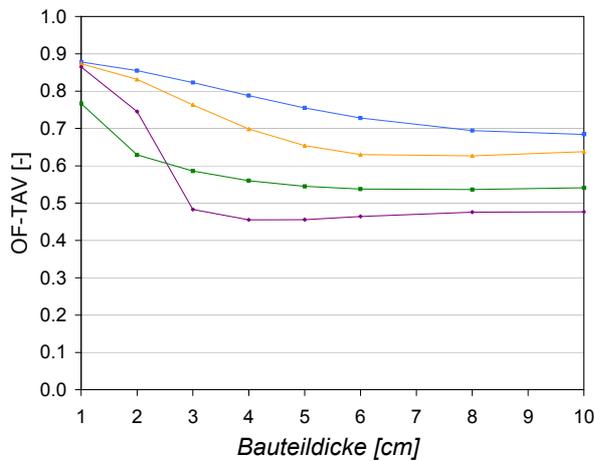


Abb. 5-26: OF-TAV eines PCM 16.5

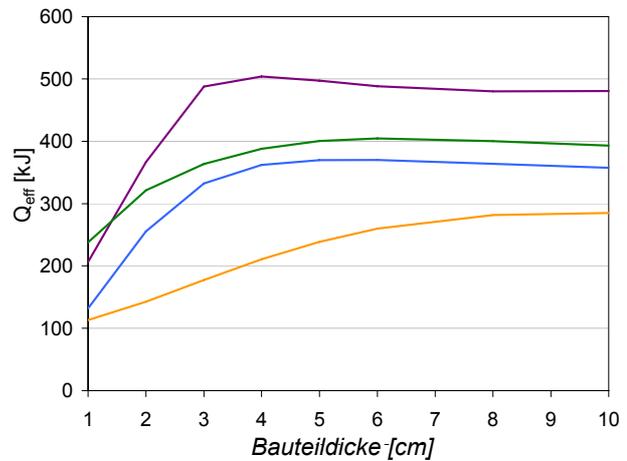


Abb. 5-27: Q_{eff} eines PCM 16.5

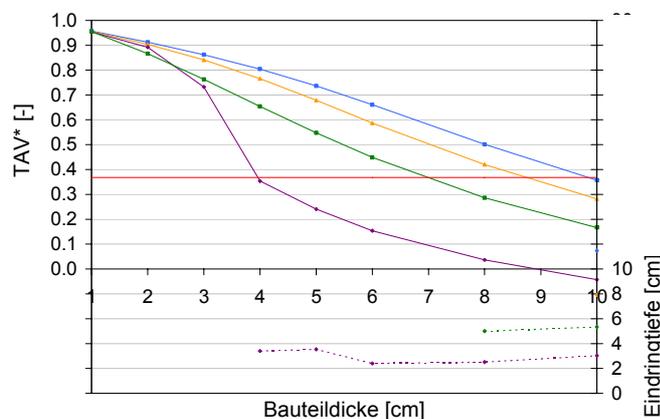


Abb. 5-28: TAV* und Eindringtiefe eines PCM 16.5

Orange: $\theta_2 = 22^\circ\text{C}$,
 Blau: $\theta_2 = 24^\circ\text{C}$,
 Violett: $\theta_2 = 26^\circ\text{C}$,
 Grün: $\theta_2 = 28^\circ\text{C}$

$$\theta_{RL} = 25.0^\circ\text{C} + 4.5 \text{ K} * \sin(2\pi/24h * t)$$

$$\lambda = 0.21 \text{ W/mK}$$

Unter den angenommenen Temperaturverhältnissen im Raum erzielt ein Phasenübergangsbereich mit einer Peak-Temperatur $\theta_2 = 26^\circ\text{C}$ die besten Effekte.

Bei niedrigeren Schmelzbereichen ($\theta_2 = 22^\circ\text{C}$, $\theta_2 = 24^\circ\text{C}$) beginnt der Phasenübergangsbereich unterhalb der Mitteltemperatur der Raumlufte. Die PCM-Schicht ist dann zum Zeitpunkt der hohen Raumlufte Temperaturen bereits auf einem Temperaturniveau oberhalb des Phasenübergangsbereichs und die Oberflächentemperatur folgt in hohem Maße der Raumlufte Temperatur.

Bei einer höheren Peak-Temperatur $\theta_2 = 28^\circ\text{C}$ kann die Latentwärme nicht vollständig genutzt werden, da der Phasenübergang zu spät einsetzt, nämlich zu einem Zeitpunkt, an dem die Raumlufte Temperatur bereits wieder abfällt. Dadurch durchlaufen die Bauteilschichten den Phasenübergang nur teilweise.

Eine 3 - 4 cm dicke Schicht eines PCM 16.5 mit einer Peak-Temperatur $\theta_2 = 26^\circ\text{C}$ bringt bei der gewählten Innentemperatur ideale Effekte im Hinblick auf die maximale Oberflächentemperaturreduktion (Abb. 5-26) und die zeitliche Dauer der reduzierten Oberflächentemperaturen (Abb. 5-27). Im Bauteil kann die Temperaturschwingung auf $1/e$ abgesenkt werden, wobei die wirksame Dicke d^* bzw. die Eindringtiefe 3 - 4 cm beträgt (Abb. 5-28).

5.6.2 Wärmeübergang

Der raumseitige Wärmeübergangskoeffizient h_i [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] bestimmt bei gegebener Raumlufte Temperatur maßgeblich die Wärmestromdichte an der raumseitigen Oberfläche und somit den Wärmeeintrag in das Bauteil. Bei einer vorgegebenen Lufttemperaturschwankung im Raum (hier: $\theta_{\text{RL}} = 25.0^\circ\text{C} + 4.5 \text{ K} \cdot \sin(2\pi/24\text{h}\cdot t)$) nimmt die im Bauteil für Temperaturdifferenzen $(\theta_{\text{RL}} - \theta_{\text{OF}}) > 0$ eingespeicherte Wärmemenge mit zunehmendem Wärmeübergangskoeffizienten zu, während die Differenz zwischen Raumlufte- und Oberflächentemperatur abnimmt.

In Abb. 5-29 - 5-32 werden am Beispiel eines PCM 16.5 mit Peak-Temperaturen von $\theta_2 = 24^\circ\text{C}$ und $\theta_2 = 26^\circ\text{C}$ (jeweils exp. Fkt.) die Werte des raumseitigen Wärmeübergangswiderstands wie folgt variiert:

- | | | | |
|--|------------|--|----------|
| • $1/h_i = 0.2 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ | | $h_i = 5.0 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ | (grün) |
| • $1/h_i = 0.13 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ | (DIN-Wert) | $h_i = 7.69 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ | (blau) |
| • $1/h_i = 0.065 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ | | $h_i = 15.38 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ | (orange) |

Die in Abb. 5-29 und 5-31 abgebildeten OF-TAV zeigen, dass sich bei vermehrtem Wärmeübergang der Beginn des ungestörten Bereichs hin zu höheren Bauteildicken verschiebt. Wird der Wärmeeintrag in das PCM aufgrund eines größeren Wärmeübergangskoeffizienten erhöht, können also auch tiefere Bauteilschichten genutzt werden. Bei einer Verdopplung des Wärmeübergangskoeffizienten gegenüber dem DIN Wert erhöht sich die empfohlene Schichtdicke für ein PCM 16.5 um 0.5 - 1 cm.

Der Abfall des TAV* signalisiert die Bauteildicke, ab welcher die tieferen Schichten des PCM nicht mehr komplett den Phasenübergang durchlaufen. Somit wird das TAV* in hohem Maße von der Peak-Temperatur θ_2 in Zusammenhang mit dem Wärmeeintrag bzw. Wärmeübergang beeinflusst. Je höher der Wärmeübergang, umso dickere PCM-Schichten sind nötig, um zu verhindern, dass das komplette Bauteil die Peak-Temperatur θ_2 überschreitet (Abb. 5-30).

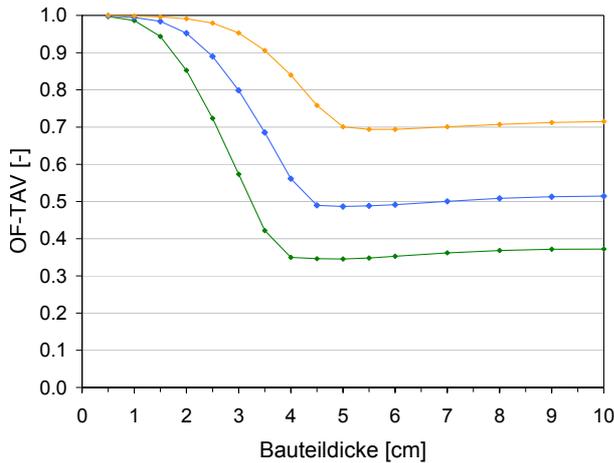


Abb. 5-29: OF-TAV eines PCM 16.5, $\theta_2 = 24^\circ\text{C}$

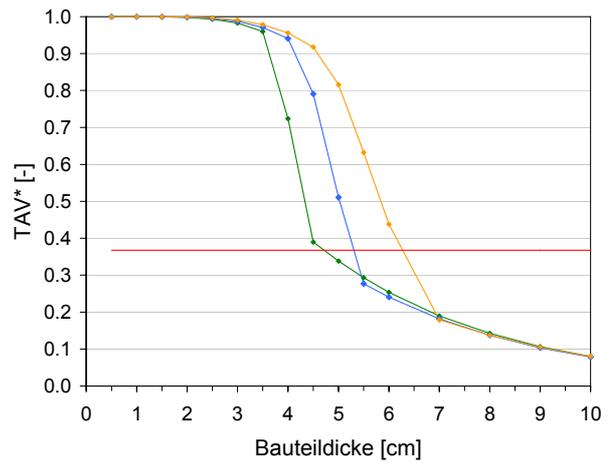


Abb. 5-30: TAV* eines PCM 16.5, $\theta_2 = 24^\circ\text{C}$

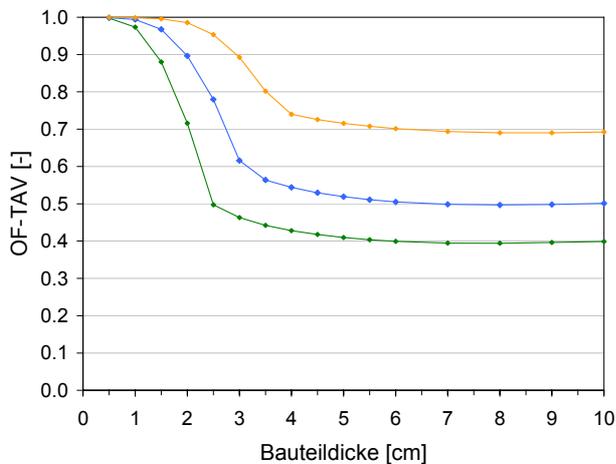


Abb. 5-31: OF-TAV eines PCM 16.5, $\theta_2 = 26^\circ\text{C}$

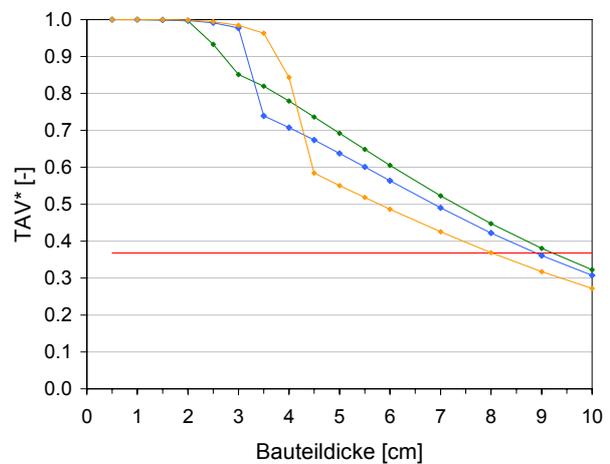


Abb. 5-32: TAV* eines PCM 16.5

$$\theta_{RL} = 25.0^\circ\text{C} + 4.5 \text{ K} \cdot \sin(2\pi/24h \cdot t)$$

Wärmeübergangskoeffizienten: Grün: $h_i = 5.0 \text{ W/m}^2\text{K}$; Blau: $h_i = 7.69 \text{ W/m}^2\text{K}$; Orange $h_i = 15.38 \text{ W/m}^2\text{K}$

In Abb. 5-32 wird bei einem Wärmeübergangskoeffizienten von $h_i = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$ die Peak-Temperatur θ_2 im Bauteil nie überschritten. Das gesamte PCM-Bauteil befindet sich während des Tages im Phasenübergangsbereich. Das TAV*, das durch die Temperaturspreizung im Bauteil bestimmt wird, nimmt daher mit zunehmender Bauteildicke kontinuierlich ab. Bei einem Wärmeübergangskoeffizienten von $h_i = 7.69 \text{ W/m}^2\text{K}$ überschreitet das gesamte PCM-Bauteil bei Schichten $< 3.5 \text{ cm}$ die Peak-Temperatur θ_2 . Das PCM verfügt in diesem Temperaturbereich über eine konstante und deutlich höhere Temperaturleitfähigkeit und folgt entsprechend der Lufttemperatur. Die Temperaturspreizung im Bauteil ist nur gering. Das TAV* ist in der Folge für diese kleinen Schichtdicken sehr hoch. Ab einer Schichtdicke von 3.5 cm gilt, dass die Temperatur an der Grenzschicht zur Mineralwolle die Peak-Temperatur θ_2 gerade nicht überschreitet, womit in Bezug auf die Ausnutzung der Wärmespeicherfähigkeit bei einer konkreten Bauteildicke der Idealfall erreicht wurde. Bei einem Wärmeübergangskoeffizienten von $h_i = 15.38 \text{ W/m}^2\text{K}$ wird dieser Idealfall erst bei 4.5 cm erreicht.

6 Gebäudesimulation zur Bestimmung des Raumklimas

6.1 Das Gebäudesimulationsprogramm ESP-r

ESP-r ist ein an der Strathclyde-Universität Glasgow entwickeltes dynamisches Gebäudesimulationsprogramm [91], das auf Grundlage einer Finiten-Volumen-Methode Raumluft- und Bauteiltemperaturen berechnet. Die Wärmeleitung in massiven Bauteilen wird eindimensional mit einem Differenzen-Verfahren nach der Crank-Nicholson-Methode numerisch gelöst. Für das Luftvolumen einer thermischen Zone gilt die Annahme einer uniformen Temperatur. Der konvektive Wärmeübergang zwischen der Raumluft und den raumseitigen Begrenzungsflächen wird mit empirischen Gleichungen berechnet, wobei dem Nutzer die Wahl des geeigneten Algorithmus frei steht.⁹ Der langwellige Strahlungsaustausch zwischen Oberflächen wird mit Hilfe von geometrischen Einstrahlzahlen berechnet. Die optischen Eigenschaften der transparenten Flächen werden winkelabhängig angegeben.

ESP-r läuft auf UNIX-Rechnern oder unter Linux-Betriebssystemen. Programmfunktionalitäten sind in C geschrieben, während der eigentliche Quellcode der Gebäudesimulation in FORTRAN programmiert ist. Der Quellcode und die Datenbanken sind offen zugänglich und erweiterbar. Dadurch kann das Simulationsmodell ideal an die Problemstellung angepasst werden. Als problematisch muss die mangelhafte Dokumentation der meisten Subroutinen und die Handhabung des Programms im Allgemeinen angesehen werden.

Ein erstes PCM-Modul für ESP-r wurde von Heim [60] entwickelt. Es approximiert den Phasenübergang als Rechteck-Funktion oder als Geradengleichung. Die Eingabe der Parameter erfordert eine Berechnung der Koeffizienten der Geradengleichung.

6.2 Implementierung eines PCM-Moduls in ESP-r

ESP-r berechnet die Wärmeleitung in einem Bauteil nach der Crank-Nicholson-Methode [85]. Dieses implizite Verfahren berücksichtigt sowohl die Temperaturen des aktuellen Zeitschritts wie auch die Temperaturen des folgenden Zeitschritts und gewichtet beide jeweils mit dem Faktor $\gamma = 0.5$ (s. a. Kap. 4.2.1).

Die numerische Formulierung der Wärmeleitung in einem homogenen Bauteil nach Crank-Nicholson ohne Berücksichtigung der Ränder und mit Wärmequellterm kann unter Verwendung der in ESP-r üblichen Nomenklatur folgendermaßen dargestellt werden:

$$TF - TP = Fo \cdot \left(\frac{TF1 + TP1}{2} - (TF + TP) + \frac{TF2 + TP2}{2} \right) + \frac{\Delta t}{2 \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta x^2} (qF + qP) \quad [6-1]$$

⁹ Für die vorliegenden Simulationsrechnungen wurden die Korrelationen von Alamdari und Hammond [21] benutzt.

- TP: Present Temperature [°C] des Knoten N
- TP1: Present Temperature [°C] linksseitig
- TP2: Present Temperature [°C] rechtsseitig
- TF: Future Temperature [°C] des Knoten N
- TF1: Future Temperature [°C] linksseitig
- TF2: Future Temperature [°C] rechtsseitig
- qP: Present Wärmequellterm [W/m]
- qF: Future Wärmequellterm [W/m]

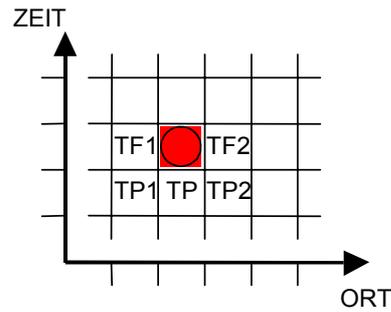


Abb. 6-1: Skizze der örtlichen und zeitlichen Diskretisierung für ein implizites Differenzenverfahren mit einem Implizitheitsgrad von $\gamma = 0.5$

Fo: Fourier-Zahl:
$$Fo = \frac{\lambda \cdot \Delta t}{\rho \cdot c \cdot \Delta x^2} \quad [6-2]$$

6.2.1 Prinzip von SPMPC54 und SPMPC55

Die in Kap. 4.2.2 vorgestellte Beschreibung des Phasenübergangs mittels einer temperaturabhängigen spezifischen Wärmekapazität wurde in zwei neu in ESP-r implementierten PCM-Subroutinen umgesetzt. Da die numerische Berechnung der Wärmetransportvorgänge opaker Bauteile in dem komplexen Hauptmodul des Simulationsprogramms ESP-r untergebracht ist, wird die Behandlung des Phasenübergangs in einem ausgegliederten Modul unternommen (Source-Code s. Anhang 8).

Als die zur Berechnung des Phasenübergangs entscheidenden Parameter sind in erster Linie die Temperaturen θ_1 und θ_2 , die den Temperaturbereich des Phasenübergangs einschließen, und die spezifische Schmelzwärme des PCM zu nennen. Als ergänzende Kenndaten können darüber hinaus Werte für spezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit im festen und im flüssigen Zustand gewählt werden.

Die Angabe der rein thermischen Materialparameter ist dann ausreichend, wenn in der Simulation auf das Modul SPMPC54 zurückgegriffen wird. Dieser Subroutine liegt ein Verlauf der Funktion $c_{\text{latent}}(\theta)$ im Phasenübergang entsprechend Gl. 3-23 zugrunde, die die Annahme eines 10 K breiten Temperaturbereiches des Phasenübergangs und eine Umsetzung der materialspezifischen Schmelzwärme gemäß Abb. 6-2 beinhaltet. Es wird von einem nicht unterkühlten Erstarrungsvorgang ausgegangen. Damit entspricht die Peak-Temperatur des Phasenübergangs θ_2 der Erstarrungstemperatur. Eine im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Untersuchung ergab, dass auf Basis von DSC-Messungen für unterschiedliche PCM mit unterschiedlichen Peak-Temperaturen die Koeffizienten aus Gl. 3-23 gemäß Gl. 6-3 berechnet werden können:

$$a = -b \cdot \theta_2 + d \cdot \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) + e \quad [6-3]$$

Die Koeffizienten b, d und e sind bekannt, wobei b der Konstanten aus Gl. 3-22 und Gl. 3-23 entspricht. Der Referenzwert für die spezifische Latentwärme entspricht $l_0 = 1.0 \text{ kJ/kg}$.

Der Vorteil dieses Moduls gegenüber anderen Funktionen ist offensichtlich: Der Nutzer muss nicht über Kenntnis von Approximationskoeffizienten verfügen, sondern lediglich die spezifische Latentwärme des Materials und die Peak-Temperatur θ_2 des Phasenübergangs kennen. Variationen des Schmelzpunktes und der Latentwärme sind daher problemlos möglich.

Weicht der Verlauf des zu untersuchenden PCM stark von den im Modul SPMPC54 zugrunde liegenden Annahmen (exponentieller Verlauf der latenten Wärmekapazität in einem 10 Kelvin betragenden Temperaturbereich) ab, kann auf das Modul SPMPC55 ausgewichen werden. Hier können die Koeffizienten einer vom Nutzer selbst approximierten Funktion zur Beschreibung der temperaturabhängigen Wärmekapazität entsprechend Gl. 3-19 genutzt werden. Da Gl. 3-19 einfach analytisch integrierbar ist, lässt sich die durch die Funktion $c_{\text{latent}}(\theta)$ umgesetzte Latentwärme berechnen. Durch entsprechende Wahl der Koeffizienten kann die Breite des Phasenübergangsbereichs $[\theta_1; \theta_2]$ beeinflusst werden. Das Ende des Phasenübergangs θ_2 kann vom Nutzer bestimmt werden und der Verlauf der umgesetzten Latentwärme kann somit an das untersuchte Material angepasst werden (Abb. 6-3).

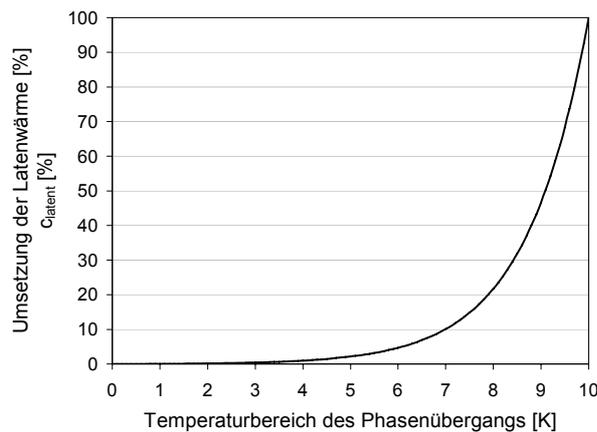


Abb. 6-2: $c_{\text{latent}}(\theta)$ und Latentwärmeumsatz gemäß Gl. 3-23

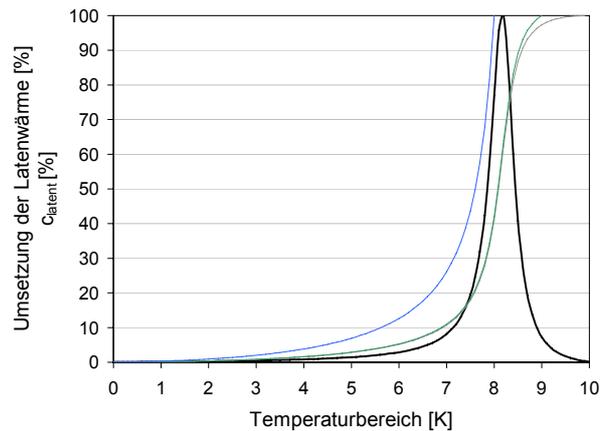


Abb. 6-3: $c_{\text{latent}}(\theta)$ (schwarz) und Latentwärmeumsatz abhängig von der gewählten Peak-Temperatur θ_2 (Blau: 8 K, Grün: 9 K, Grau: 10 K)

Unabhängig davon, welches Modul für die Gebäudesimulation gewählt wurde, werden in beiden PCM-Modulen Korrekturfaktoren berechnet, mit denen die thermischen Konstanten der Wärmeleitungsgleichung modifiziert werden. Diese Korrekturfaktoren bestimmen sich wie folgt:

$$c - \text{Faktor} = \frac{c(\theta)}{c_{\text{solid}}} \quad [6-4]$$

Das Prinzip der Subroutinen SPMPC54 und SPMPC55 besteht aus einer Multiplikation der spezifischen Wärmekapazität mit dem c-Faktor (Gl. 6-3). An die Stelle des Wertes für die spezifische Wärmekapazität im festen Zustand (c_{solid}) tritt dann der in Abhängigkeit von der aktuellen Temperatur berechnete Wert von $c(\theta)$.

6.2.2 Variation der spezifischen Wärmekapazität

Die Variation der spezifischen Wärmekapazität im flüssigen Zustand, also oberhalb von θ_2 , folgt dem Prinzip der Behandlung des Phasenübergangs (Gl. 6-4). Da im Allgemeinen die spezifische Wärmekapazität im rein festen und im rein flüssigen Zustand nur eine geringe Temperaturabhängigkeit aufweist, wird bei der Variation der spezifischen Wärmekapazität ein konstanter Wert im flüssigen Zustand angenommen. Analog zum unter 6.2.1 beschriebenen Vorgehen, wird die spezifische Wärmekapazität im festen Zustand (c_{solid}) mit dem c-Faktor aus Gl. 6-4 multipliziert.

6.2.3 Variation der Wärmeleitfähigkeit

Während das Prinzip der variablen spezifischen Wärmekapazität exakt dem Vorgehen während des Phasenübergangs entspricht, muss für die Veränderung der Wärmeleitfähigkeit von diesem Vorgehen etwas abgewichen werden. Für den Wert der Wärmeleitfähigkeit im Phasenübergangsbereich zwischen θ_1 und θ_2 wird ein konstanter Wert angenommen, da eine temperaturabhängige variable Wärmeleitfähigkeit eine örtliche Diskretisierung für die erste Ableitung nach der Temperatur gemäß Fourier'scher Wärmeleitungsgleichung erfordert. Da das PCM-Modul nicht in die Hauptsimulationsmodule eingreift, wurde auf eine Berücksichtigung der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit, wie sie in Kap. 4.2.3 vorgenommen wurde, verzichtet. Die Untersuchungen in Kap. 5.3.2 zeigen einen relativ geringen Einfluss der variablen Wärmeleitfähigkeit auf die tatsächliche Performance des PCM. Daher kann ein konstanter Wert für λ im Phasenübergangsbereich als zulässig angesehen werden.

Der Korrekturfaktor, der den Wert der Wärmeleitfähigkeit während und oberhalb des Phasenübergangs modifiziert, lautet wie folgt:

$$\lambda - \text{Faktor} = \frac{\lambda(\theta)}{\lambda_{\text{solid}}} \quad [6-5]$$

$$\begin{aligned} \theta < \theta_1: & \quad \lambda = \lambda_{\text{solid}} \\ \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2: & \quad \lambda = \lambda_{\text{PCM}} \\ \theta > \theta_2: & \quad \lambda = \lambda_{\text{liquid}} \end{aligned}$$

6.2.4 Überprüfung des Programms

Die Überprüfung des physikalischen Modells und der verwendeten Materialparameter für den untersuchten Putz werden in Kap. 7 dargestellt. Um unabhängig davon den Programmcode auf eventuelle Programmierfehler zu überprüfen, wurden zwei identische Räume simuliert. Dabei wurden die Temperaturen des Raumes ohne PCM auf herkömmliche Weise berechnet, während beim anderen Raum auf das implementierte PCM-Modul zurückgegriffen wurde. Der Temperaturbereich des Phasenübergangs wurde jedoch so gewählt, dass in jedem Durchlauf entweder nur der Zustand „fest“ oder der Zustand „flüssig“ auftrat. Von einem fehlerfreien Funktionieren des PCM-Moduls kann ausgegangen werden, da unter den in Tab. 6-1 genannten Annahmen die Temperatur in beiden Räumen identisch war. (Die simulierten Temperaturen lagen im Temperaturbereich $15^\circ\text{C} < \theta < 40^\circ\text{C}$.)

Ohne PCM		Mit PCM				Temperaturbereich des Phasenübergangs	
c [J/kg]	λ [W/mK]	c_{solid} [J/kg]	λ_{solid} [W/mK]	c_{liquid} [J/kg]	λ_{liquid} [W/mK]	θ_1 [°C]	θ_2 [°C]
1000	0.21	3000	0.21	1000	0.21	0	10
1000	0.21	50	0.21	1000	0.21	0	10
1000	0.21	1000	0.21	50	0.21	50	60
1000	0.21	1000	0.21	1000	2.0	50	60
1000	0.21	1000	2.0	1000	0.21	0	10

Tab. 6-1: System zur Überprüfung der programmierten PCM-Module SPMCP54 und SPMCP55

6.2.5 Örtliche und zeitliche Diskretisierung

In Abb. 6-4 ist die operative Temperatur gemäß Gl. 1-4 zu sehen, die sich in der Gebäudesimulation bei einem gewählten Zeitschritt von einer Stunde in einem Beispielraum unter Annahme verschiedener Schmelzpunkte ($\theta_2 = 24^\circ\text{C}, 26^\circ\text{C}, 28^\circ\text{C}$) bei einer Latentwärme $l = 16.5 \text{ J/g}$ einstellt. Die drei untersuchten Schmelztemperaturbereiche wurden jeweils mit der beschriebenen exponentiellen Funktion (SPMCPC54) und der gebrochen rationalen Funktion (SPMCPC55) approximiert. Die Wahl der Approximation (exponentiell oder gebrochen-rational) hat nur geringe Abweichungen der berechneten Temperaturen zur Folge.

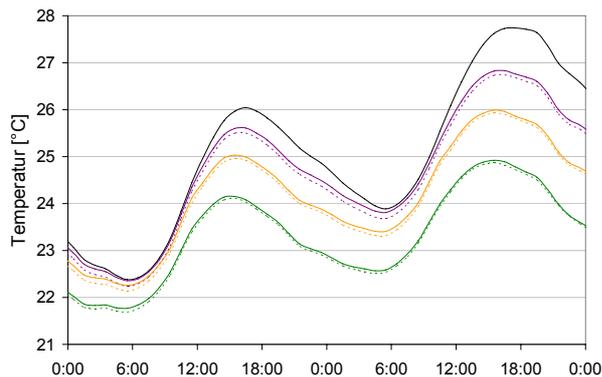


Abb. 6-4: Operative Temperaturen mit verschiedenen Temperaturen θ_2 :
Grün: 24°C , Orange: 26°C , Violett: 28°C
Schwarz: Ohne PCM
Durchgezogene Linie: SPMPC54
Gestrichelte Linie: SPMPC55

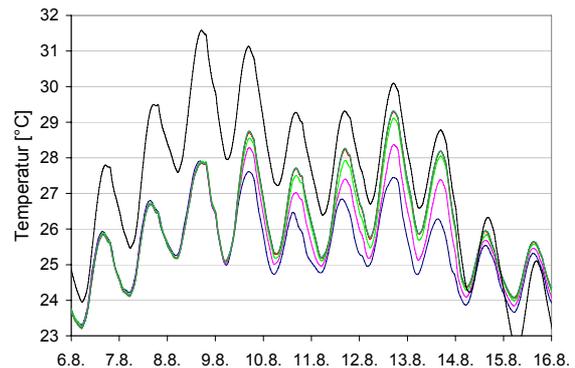


Abb. 6-5: Operative Temperaturen mit verschiedenen Zeitschrittweiten:
Blau: 60 min, Pink: 30 min, Hellgrün: 20 min,
Rot: 5 min, Dunkelgrün: 1 min
Schwarz: Ohne PCM (60 min)

Die Untersuchung verschiedener Zeitschrittweiten ergab für die Temperaturberechnungen ohne PCM keine signifikanten Abweichungen. Für den Temperaturverlauf (Lufttemperatur und Bauteiltemperaturen) mit PCM wurden an einzelnen Tagen erhebliche Abweichungen je nach Zeitschrittweite festgestellt. Abb. 6-5 zeigt Simulationsergebnisse, für die beispielhaft die Approximation mit der gebrochen-rationalen Funktion bei einer Temperatur θ_2 von 26°C gewählt wurde. Die Wahl des Zeitschritts beeinflusst das berechnete Ergebnis um bis zu 2 Kelvin und stellt somit eine Abweichung in der Größenordnung des untersuchten Effektes dar. Diese nicht akzeptable numerisch bedingte Differenz tritt dann auf, wenn der Temperaturverlauf des PCM sein Extremum im Bereich des maximalen Gradienten der Approximationskurve hat. Für die Simulation von Phasenübergangsmaterialien mit den Modulen SPMPC54 und SPMPC55 wird eine Zeitschrittweite $\leq 5 \text{ min}$ empfohlen.

Die örtliche Diskretisierung sollte ebenfalls nicht zu groß gewählt werden. Bei einem symmetrischen Aufbau des Knotensystems wie in ESP-r mit drei Knotenpunkten pro Layer empfiehlt sich eine Layer-Dicke von 1 cm für PCM-Layer. Diese Layer-Dicke entspricht einer örtlichen Diskretisierung von $\Delta x = 5 \text{ mm}$.

6.3 Klimatische Randbedingungen

Die klimatischen Randbedingungen beeinflussen in höchstem Maße die Ergebnisse einer Gebäudesimulation. Das thermische Verhalten des simulierten Raumes bzw. des Gebäudes wird maßgeblich von der auf transparente Außenbauteile auftreffenden Solarstrahlung sowie der Außenlufttemperatur

bestimmt. Weitere Parameter wie Windgeschwindigkeit und Windrichtung und relative Feuchte der Außenluft sind für detailliertere Simulationen und bei der Untersuchung spezieller Probleme notwendig. Wird der sommerliche Wärmeschutz betrachtet, ist die genaue Kenntnis von den Windverhältnissen in erster Linie im Hinblick auf den windgetriebenen Luftwechsel bei freier Lüftung wichtig. Der Wärmeübergang an der Außenseite der opaken Außenbauteile spielt eine untergeordnete Rolle.

Bei der Effizienzbetrachtung von PCM im Innenraum sind Außenlufttemperatur und Solarstrahlung die entscheidenden Größen. Im Gebäudesimulationsprogramm ESP-r können die Solarstrahlungsdaten vom Nutzer sowohl als Datensatz „Globalstrahlung auf horizontale Fläche – Diffusstrahlung“ wie auch als Datensatz „Normalstrahlung – Diffusstrahlung“ bereitgestellt werden, wobei ESP-r den Sonnenstand zu jedem Zeitpunkt der Simulation berechnet. In dem zu erstellenden Klima-File wird neben den Solarstrahlungsdaten auch die Außenlufttemperatur eingelesen. Diese bestimmt den Transmissionswärmestrom zwischen innen und außen und beeinflusst luftwechselbedingt die Innentemperatur. Die Daten des Klimafiles werden in Stundenwerten eingegeben.

In der thermischen Gebäudesimulation bewirkt die Außenlufttemperatur, neben dem Wärmedurchgang durch Außenbauteile, in Abhängigkeit von der angesetzten Luftwechselrate eine Temperaturveränderung der Raumluft. Zur Festlegung des Luftwechsels in der Simulation sollte ein sinnvoller Regelungsmechanismus gewählt werden. Dieser muss während der Nutzungszeit eine hygienisch notwendige Lüfterneuerungsrate von mindestens 20 m³ Frischluft pro Person und Stunde gewährleisten und eine zeitabhängige (z.B. erhöhte Nachtlüftung) oder temperaturabhängige Anpassung des zugeführten Außenluftvolumenstroms ermöglichen. In realen Gebäuden werden die gewünschten Zuluft-Volumenströme mittels mechanischer Lüftungsanlagen eingestellt. Eine reine Fensterlüftung führt zu größeren Ungenauigkeiten bei der Bestimmung des tatsächlichen temperatur- und/oder windgetriebenen Luftwechsels. Die Arbeiten von [92] u.a. geben Hinweise auf anzusetzende Volumenströme in Abhängigkeit der geometrischen Ausbildung der Fensteröffnung, der Art der Lüftung (Querlüftung, Stoßlüftung) und der Art des Antriebs (Stack-Effekt, Temperaturdifferenz, Winddruck). Da Daten über vorherrschende Windgeschwindigkeit und Windrichtung häufig nur unzureichend vorhanden sind, wurde der Luftwechsel in der Simulation als zeitabhängige, aber jeweils konstante diskrete Größe dargestellt.

Die Solarstrahlung bewirkt in oberflächennahen Schichten opaker und transparenter Bauteile durch die vom materialspezifischen Absorptionsgrad abhängige Absorption eine Temperaturerhöhung und nimmt somit Einfluss auf den Wärmestrom von Außenbauteilen. In wesentlich stärkerem Maße beeinflusst sie jedoch die Temperaturen im Rauminnen durch den durch transparente Flächen transmittierten Strahlungsanteil. Wie viel Strahlung in das Innere des Raumes dringt, ist im Falle einer Einfachverglasung abhängig von ihrem Transmissionsgrad. Im Falle einer Mehrfachverglasung spielen außer den Transmissionsgraden der einzelnen Gläser auch die Reflexionsgrade der einzelnen Verglasungen eine Rolle. Da Transmissions- und Reflexionsgrade in ESP-r winkelabhängig betrachtet werden, ist eine Unterteilung der Globalstrahlung in ihren diffusen und ihren direkten Anteil nötig [93].

Von dem transmittierten Strahlungsanteil wird an den Oberflächen der inneren Raumbegrenzungsflächen entsprechend des solaren Absorptionsgrades Strahlungsenergie aufgenommen und in eine Temperaturerhöhung der oberflächennahen Schicht umgesetzt. Der nicht absorbierte Anteil bewirkt eine Temperaturerhöhung der Raumluft.

6.3.1 Testreferenzjahr DWD

Die Testreferenzjahre (TRY) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) basieren auf Messwerten von Witterungsabschnitten, deren Mittelwerte in hohem Maße mit den dreißigjährigen Mittelwerten übereinstimmen. Die verschiedenen Witterungsabschnitte wurden mit einem Interpolations- und Glättungsverfahren zu Datensätzen mit stündlichen Werten der interessierenden Klimaparameter zusammengesetzt. Für die in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Simulationen wurden Klimaparameter aus den 1985 vom DWD veröffentlichten Testreferenzjahren benutzt. Diese TRYs bestehen zu 15 % aus Messdaten und zu 85 % aus auf Basis von Messdaten generierten Daten. Als Referenzzeitraum der für 12 verschiedene Klimaregionen der alten Bundesländer erstellten Datensätze, wurden die Jahre 1951 - 1970 gewählt [94].

Die in die thermische Gebäudesimulation mit ESP-r eingehenden Klimadaten sind stündliche Werte für Außentemperatur, Globalstrahlung auf eine horizontale Fläche, Diffusstrahlung, Windgeschwindigkeit, Windrichtung und relative Feuchte. Für den Standort Weimar-Apolda wurde in Absprache mit dem DWD das Testreferenzjahr 4 „Nördliche und westliche Mittelgebirge ohne Hochlagen“ gewählt.

6.3.2 Messdaten

Zur Validierung des PCM-Moduls in der Simulation wurden messtechnische Untersuchungen unter annähernd realen Bedingungen durchgeführt (s. Kap. 7). Am Standort des Versuchsaufbaus wurden Klimadaten messtechnisch aufgezeichnet. Die Lufttemperatur wurde mit einem strahlungsgeschützt angebrachten Thermoelement des Typs K ca. 0.5 m vor der Außenwand der Messräume gemessen. Ein mit einem Pyranometer verbundener Datenlogger zeichnete auf dem Dach des Gebäudes Globalstrahlungswerte in Viertelstundenwerten auf.

Die messtechnische Bestimmung des diffusen Anteils der gemessenen Globalstrahlung wäre mit einem zweiten Pyranometer, auf dem ein Schattenring angebracht ist, möglich. Da dieser Versuchsaufbau ein tägliches Nachjustieren des Schattenrings entsprechend dem jahreszeitlichen Sonnenstand erfordert und die örtliche Nähe zum Messgerät für eine mechanische Anpassung nicht gegeben war, wurde auf eine experimentelle Bestimmung verzichtet und eine Berechnung auf Grundlage empirischer Gleichungen vorgenommen.

Forschungsarbeiten zur Aufteilung von solarer Globalstrahlung in ihren diffusen und ihren gerichteten (direkten) Anteil wurden unter anderem von Liu Jordan [95], Page [96] und Erbs [97] durchgeführt. Heidt empfiehlt 1981 für bundesdeutsche Klimata die Anwendung der Algorithmen von Page [98].

Um die Gültigkeit dieser Empfehlung für den Standort der Messeinrichtung in Mitteldeutschland zu überprüfen, wurden die verschiedenen Algorithmen auf Globalstrahlungswerte der DWD-Wetterstation Halle angewandt und mit Messwerten verglichen. Für den Standort Halle liegen nach oben beschriebener Methode (Pyranometer mit Schattenring) erzielte Messwerte für die diffuse Strahlung vor. Der betrachtete Zeitraum umfasst die Tage 11.7.2003 - 8.8.2003.

Um die Vergleichbarkeit der 130 km entfernten Standorte Halle ↔ Weimar zu überprüfen, wurde ein Vergleich der in diesem Zeitraum in Halle und in Weimar gemessenen und über die Zeit aufsum-

mierten Globalstrahlung durchgeführt. Es ergab sich eine Abweichung von 9 % weniger Solareintrag auf eine horizontale Fläche am Standort Weimar.

Für die weitere Bearbeitung der Daten wurden die Messwerte von mitteleuropäischer Sommerzeit (MEZ) in die wahre Ortszeit (WOZ) umgerechnet. Auf die Werte der Globalstrahlung aus Halle wurden die Approximationen zur Bestimmung des Direkt- und Diffusstrahlungsanteils von Liu Jordan, Page und Erbs angewandt. Die betrachteten Tage waren vorwiegend heiß und strahlungsreich. Hier zeigen sich die nach Liu Jordan erhaltenen Werte als am nächsten an den gemessenen Strahlungsdaten der Diffusstrahlung. Für stärker bedeckte Tage ermittelt die Gleichung von Page eine realistischere Aufteilung von Diffus- und Direktanteil.

Für die Umrechnung der in Kap. 7 verwendeten Messdaten wurden abschnittsweise, entsprechend der gemessenen Globalstrahlung, jeweils die Algorithmen für Liu Jordan (strahlungsreiche Tage) bzw. Page (bedeckte Tage) angewandt.

7 Validierung des numerischen Modells

Zur Validierung eines numerischen Modells stehen verschiedene Möglichkeiten zur Auswahl:

- experimentelle Validierung
- analytische Validierung
- komparative Validierung

Die erfolgreiche experimentelle Validierung führt zur größten augenscheinlichen Sicherheit. Die Gebäudesimulation benötigt diverse Randbedingungen, die zum Teil nur sehr ungenau bekannt sind. Dazu gehören in erster Linie der reale Solareintrag in den Raum, der tatsächliche konvektive Wärmeübergang und die Materialeigenschaften der Konstruktionen des Testgebäudes. Die Kompensation von falschen Annahmen kann zu einer erfolgreichen Validierung eines falschen Modells führen bzw. Abweichungen von experimentellen und numerisch berechneten Daten bei Verwendung eines richtigen Modells zur Folge haben. Weitere Nachteile der experimentellen Validierung sind die Kosten und der Zeitaufwand von realistischen Versuchsständen.

Die Validierung eines numerischen Modells durch Abgleich mit der exakten Lösung ist eine zuverlässige Methode im Rahmen der Problemstellung. Da exakte analytische Lösungen jedoch meist nur für sehr beschränkte und vereinfachte Randbedingungen vorhanden sind, ist diese Form der Validierung unter Umständen nicht für komplexere Randbedingungen gültig. Im Fall von Phasenübergangsmaterialien sind analytische Lösungen für konstante Oberflächentemperaturen erhältlich (s. Kap. 4.1); die Oberflächentemperaturen der Begrenzungsflächen eines Raumes sind jedoch in hohem Maße nicht linear und hängen von konvektivem und strahlungsbedingtem Wärmeübergang ab.

Die vergleichende Validierung, bei der dasselbe mathematische Modell in verschiedenen Simulationsumgebungen implementiert wird, dient in erster Linie zur Überprüfung des programmierten Codes. Programmfehler lassen sich durch speziell definierte Testsimulationen, in denen jedes Teilproblem zum Tragen kommt, identifizieren. Da das zu Grunde gelegte mathematische Modell bei der komparativen Validierung für alle Simulationsumgebungen beibehalten wird, dürfen nur minimale Abweichung durch unterschiedliche Solver auftreten.

7.1 Testräume im „Eiermann-Bau“

Die experimentelle Validierung wurde durch den Messdatenvergleich mit dem Verifikationsobjekt des SFB 524 durchgeführt. Dazu wurden im so genannten „Eiermann-Bau“ in Apolda¹⁰ zwei annähernd baugleiche Räume in Leichtbauweise hergestellt, deren Innenwände und Decke mit PCM-Putz bzw. einem entsprechenden herkömmlichen Gips-Innenputz (Referenzraum) verputzt wurden. Abluftventilatoren mit Regelungsmöglichkeit lassen unterschiedliche Lüftungsregimes zu. Die Außenluft wird durch eine Öffnung im unteren Bereich der Fassade angesaugt und über den Ventilator aus dem Testraum heraus in den Vorraum geblasen.

¹⁰ Der Architekt Egon Fritz Wilhelm Eiermann (1904 - 1970) entwarf 1938/39 die Erweiterung des 1906 erbauten Fabrikgebäudes „Total Werk Foerstner & Co“ in Apolda, in dem Feuerlöscher produziert wurden

Beide Versuchsräume wurden mit Temperatur-Messfühlern ausgestattet, deren Messwerte über einen Datenlogger an die Meßwerterfassung weiter geleitet wurden [99, 100]. In den Versuchsräumen wurden folgende Größen gemessen:

- Außenlufttemperatur,
- Innenraumtemperatur,
- Oberflächentemperatur,
- Wandtemperaturen in verschiedenen Tiefen.

Als Temperatur-Messfühler werden Thermoelemente des Typs K (NiCr - Ni) verwendet. Die Grenzabweichung (max. zu erwartende Abweichung im Temperaturbereich oberhalb von -40°C) dieser Thermoelemente laut Herstellerangabe beträgt $\pm 2.5\text{ K}$.

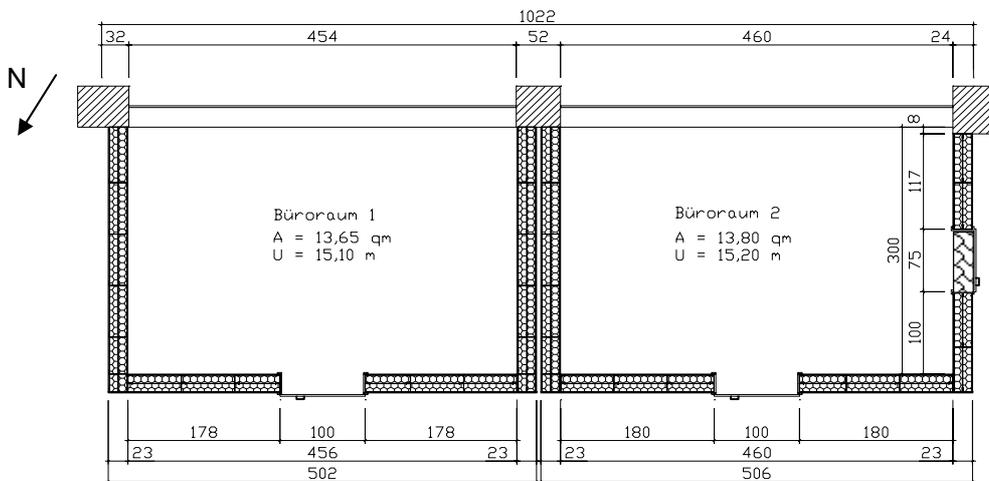


Abb. 7-1: Grundriss der beiden Versuchsräume

Die beiden Versuchsräume sind süd-süd-ost orientiert. Die Fassade besteht zu ca. 80 % aus einer Einscheiben-Verglasung. Vom Fußboden bis auf ca. 50 cm Höhe ist eine 30 cm tiefe Brüstung gemauert. Die beiden Versuchsräume wurden auf der dritten Etage des ehemaligen Industriegebäudes errichtet und in einen offenen Geschossgrundriss hineingebaut. Um einen Wärmeaustausch der Räume untereinander bzw. mit dem umgebenden Vorraum zu minimieren, wurde für die Wand- und Deckenkonstruktion ein Wärmedurchgangskoeffizient von $U = 0.18\text{ W/m}^2\text{K}$ bei einer Bauteildicke von 24 cm realisiert. Zwei 10 cm breite Ständerprofile wurden nebeneinander angeordnet und beidseitig mit Gipskarton-Bauplatten der Stärke 12.5 mm außen und 25 mm innen beplankt. Der Zwischenraum wurde mit Mineralfaser-Dämmung ausgefüllt. Auf der Innenseite wurde auf die GKB der PCM-Putz bzw. der herkömmliche Innenputz in Schichten à 5 mm aufgetragen.

Bei der Erstkonditionierung mit einer 1 cm dicken Putzschicht wurden Thermoelemente an verschiedenen Messpunkten der Wandflächen in den Tiefen 10 mm (Grenzschicht zur GKB), 5 mm und an der Oberfläche angebracht. Bei der Erweiterung der Putzschichtdicken in der zweiten Versuchsserie wurden an den Wänden zusätzlich 2 cm PCM-Putz bzw. herkömmlicher Putz aufgebracht. Zur Messung des Temperaturprofils in der 3 cm dicken Putzschicht wurden weitere Thermoelemente angebracht [101].

Um noch über die Reduktion durch PCM-Putz hinaus gehende Effekte zu erzielen, wurden von Sommer 2004 bis Frühling 2005 Makroelemente, die mit einem Salzhydrat gefüllt waren, in den

PCM-Testraum eingebracht. Da die chemische Stabilität des Salzhydrats einzelner Makroelemente im Langzeitversuch mangelhaft war, werden die Messergebnisse aus diesen Messzeiträumen nicht in dieser Betrachtung herangezogen.

Um die Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu gewährleisten, wurden vor dem Einbau des PCM Vergleichsmessungen in den Testräumen durchgeführt. Eine Blower-Door-Messung zu Beginn der Versuchsreihe im Sommer 2003 half Undichtigkeiten zu identifizieren und gleiche Verhältnisse beim Infiltrationsluftwechsel zu garantieren. Die Lufttemperaturen beider Räume wurden während des Zeitraums von Sommer 2003 bis Frühling 2004 zu verschiedenen Zeitpunkten aufgezeichnet und mit einander verglichen. Daraus konnte eine Fehlerkurve entwickelt werden, die die relativen Temperaturunterschiede zwischen den beiden Räumen aufzeigt. Während der Vergleichsmessungen war Raum 2 annähernd identisch mit Raum 1 [102]. Bei sehr hohen Raumtemperaturen (40°C) mit deutlichem Strahlungseinfluss konnte eine Abweichung von 0.2 bis maximal 1 K festgestellt werden. Im Weiteren wurde Raum 1 als der mit PCM zu konditionierende Raum festgelegt.

Als Datenaufnehmer wird eine ALMEMO – Messwerterfassungsanlage 5990-0 mit Netzteilversorgung verwendet, die Daten an einen PC übermittelt. Die Datenverarbeitung erfolgte mit der Software AMR WinControl.



Abb. 7-2: Messwerterfassungsanlage

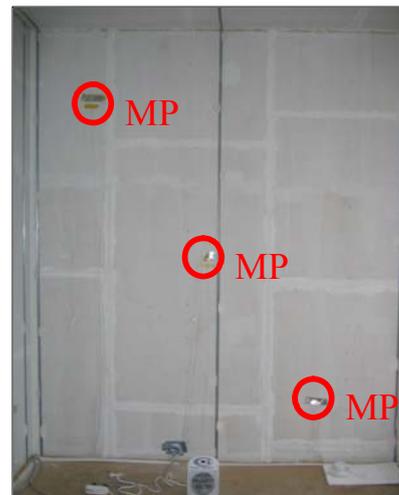


Abb. 7-3: Anordnung der Messpunkte (MP)

Die Globalstrahlung auf eine horizontale Fläche wurde mit einem Pyranometer auf dem Dach des Verifikationsobjektes gemessen. Hier trat eine zeitweilige Verschattung durch temporäre Verschattungsobjekte auf. Diese Störungen konnten aufgrund der zeitlichen Übereinstimmung einer Reduktion der Globalstrahlung auf ihren diffusen Anteil identifiziert und korrigiert werden.

Die Thermoelemente zur Lufttemperaturmessung im Raum befanden sich auf ca. 1.80 m Höhe vom Fußboden und waren durch ein beidseitig geöffnetes Rohr, das von der Raumluft durchströmt werden konnte, strahlungsgeschützt. Dennoch wurde ein Strahlungseinfluss an Tagen festgestellt, an denen durch die offenen Rohrenden direkte Strahlung auf das Thermoelement auftraf.

Auf die Messstellen zur Bestimmung der Oberflächentemperatur wurde ein Aluminiumklebeband mit hohem Reflexions- und geringem Absorptionsgrad geklebt, um den Strahlungseinfluss zu minimieren (s. a. Abb. 7-3). Die Messung der Oberflächentemperaturen und der Temperaturprofile ist nur bedingt zur Validierung brauchbar, da die physikalisch zu erwartenden Profile nicht gemessen wer-

den konnten. Aufgrund des geringen Messabstands (0.5 - 1 cm) lagen die Messfehler der Thermoelemente im Bereich der Temperaturverteilung im Bauteil.

7.2 Validierungsklimadatenatz

Aus den verwertbaren Messperioden wurde ein Validierungsdatensatz mit den Klimaparametern Außentemperatur, Globalstrahlung und Diffusstrahlung erstellt. Dieser zur Validierung verwendete Datensatz umfasst den Zeitraum vom 1.5. bis 30.9. und ist aus Messwerten der Sommers 2004 und 2005 zusammengefügt. Die Werte für die Diffusstrahlung wurden auf Grundlage der gemessenen Globalstrahlung nach verschiedenen Algorithmen bestimmt (s. Kap. 6.3.2).

In den Testräumen wurden unterschiedliche Lüftungsregimes gefahren und unterschiedliche Mengen an PCM-Putz eingebracht. Tab. 7-1 listet die verschiedenen relevanten Zeiträume auf.

	Zeitraum	Putzstärke Wände	Putzstärke Decke	Salz- hydrat*	Lüftungsregime**	Verfügbarkeit der Klimadaten	
						Außentem- peratur	Strahlung
0	27.10.03 – 2.11.03	Vergleichsmessung			Keine mech. Lüftung	x	-
1a	27.5.04 - 7.6.04	1cm	1 cm	-	Keine mech. Lüftung	x	x
1b	8.6.04- 15.6.04	1cm	1 cm	-	Keine mech. Lüftung	-	-
1c	16.6.04 - 29.6.04	1cm	1 cm	-	Keine mech. Lüftung	x	x
2a	23.4.05 - 3.5.05	1cm	1 cm	ja	0h-24h: 180 - 220 m³	- *	
2b	4.5.05 - 18.5.05	1cm	1 cm	ja	Keine mech. Lüftung		
2c	20.5.05 - 30.5.05	1cm	1 cm	ja	0h-7h: ca. 160 m³ 7h-19h: Keine Lüftung 19h-0h: ca. 160 m³		
3a	17.8.05 - 30.8.05	3 cm	1 cm	-	Keine mech. Lüftung	x	x
3b	6.9.05 - 11.9.05	3 cm	1 cm	-	0h-24h: ca. 120 m³	-	x
3c	14.9.05 - 26.9.05	3 cm	1 cm	-	0h-7h: ca. 120 m³ 7h-19h: Keine Lüftung 19h-0h: ca. 120 m³	x	x
4	4.10.05 - 4.11.05	3 cm	1 cm	ja	0h-7h: ca. 90 m³ 7h-19h: Keine Lüftung 19h-0h: ca. 90 m³	- *	

Tab. 7-1: Messzeiträume mit unterschiedlicher PCM-Konditionierung und unterschiedlichem Lüftungsregime

*Aufgrund des chemisch instabilen Verhaltens des Salzhydrats werden die Zeiträume, in denen zusätzlich zum PCM-Putz noch 200 kg Calcium-Chlorid-Hexahydrat eingebracht wurden, nicht zur Validierung herangezogen.

**Der Volumenstrom wurde durch regelmäßige Volumenstrommessungen bestimmt. Ein Leistungsabfall der Lüfter über die Messperiode von 2004 - 2005 war festzustellen und äußerte sich in reduzierten Luftvolumenströmen.

Im Falle größerer Messlücken wurden die Werte für die fehlenden Tage durch Klimawerte des Testreferenzjahres 4 des Deutschen Wetterdienstes ergänzt. Bei offensichtlichen Messfehlern durch zeitweise direkte Bestrahlung des die Innenraumtemperatur messenden Thermoelements wurden einzelne Stundenwerte manuell korrigiert, um die gesamte Testreihe noch verwenden zu können.

Für den Klimadatenatz wurden die Zeiträume 1a, 1c, 3a und 3c aus Tab. 7-1 verwendet. Um die vorhandenen Messwerte, die Messungenauigkeiten und systematischen Fehlern unterliegen können, auf Plausibilität zu überprüfen, wurden diese in Abb. 7-4 und 7-5 (pink) über die Klimadaten des Testreferenzjahres (blau) gelegt. Die hohen Außentemperaturen während der Messperiode 1a fallen gegenüber dem TRY aus dem Rahmen, können aber durch hohe gemessene Strahlungswerte erklärt werden. Sowohl im TRY wie auch bei den Validierungsklimadaten ist der Zusammenhang zwischen mehrtägiger hoher Globalstrahlung und deutlich zunehmender Außentemperatur erkennbar.

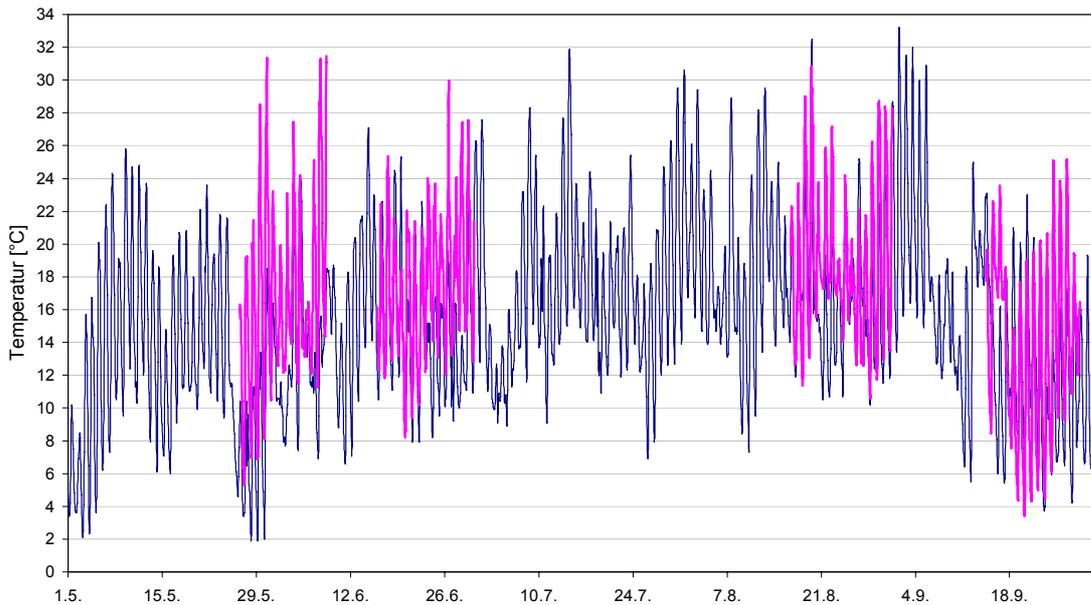


Abb. 7-4: Pink: Außentemperatur (Messung) des Validierungsklimadatenatzes
Blau: Außentemperatur des Testreferenzjahres

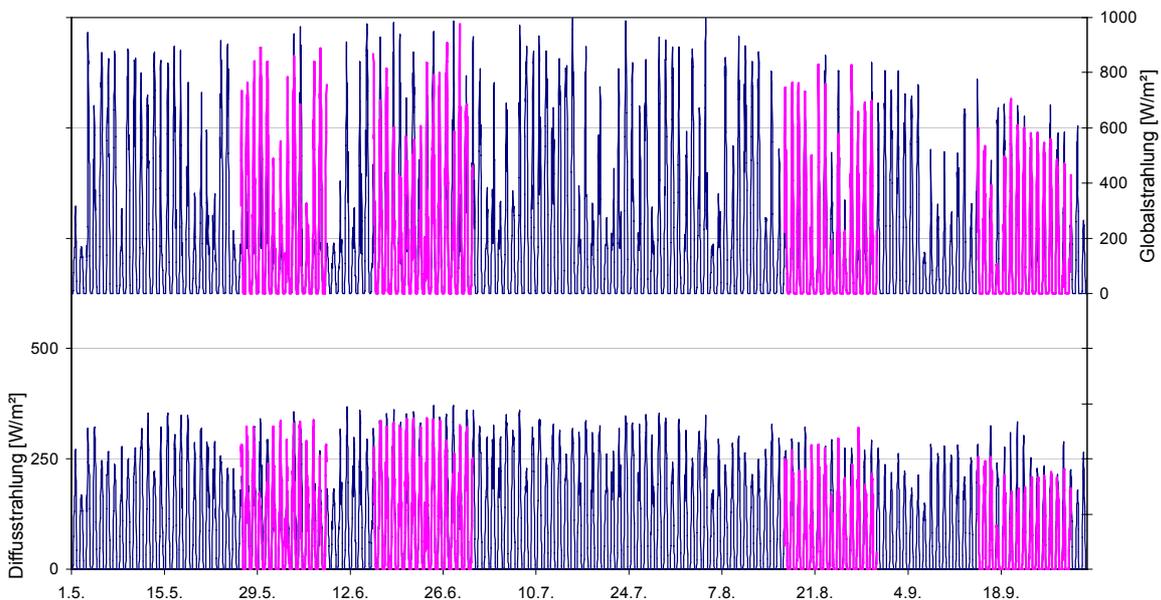


Abb. 7-5: Pink: Globalstrahlung (Messung) und Diffusstrahlung (berechnet) des Validierungsklimadatenatzes
Blau: Global- und Diffusstrahlung des Testreferenzjahres

7.3 Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen

Die Messungen der Lufttemperatur sind geprägt durch einzelne Spitzen, die die grafische Beurteilung tatsächlich erzielter Reduktionen erschweren. Daher wurden die Luft- und Oberflächentemperaturen zu Stundenwerten gemittelt. Die Frequenz der Messaufzeichnung betrug 3 min für die Messperioden 1a und 1c (2004) und 15 min für die Messperioden 3a und 3c (2005). In der Simulation wurden Zeitschritte von 3 min gewählt.

Der Vergleich von simulierten und gemessenen Oberflächentemperaturen ist aufgrund der lokalen Messstelle und den für den Messort spezifischen Wärmeübergängen gegenüber den Annahmen aus der Simulation schwierig. Die Temperaturkurve aus der Simulation stellt die Temperatur der oberflächennahen Schicht dar, in die die Wärmespeicherung im repräsentierten Volumen mit eingeht.

Die in Abb. 7-6 und 7-7 gefundene Übereinstimmung ist akzeptabel, da die relativen Verhältnisse zwischen Temperatur ohne und mit PCM in der Größenordnung stimmen und der qualitative Verlauf des Phasenübergangs hinreichend gut beschrieben wird.

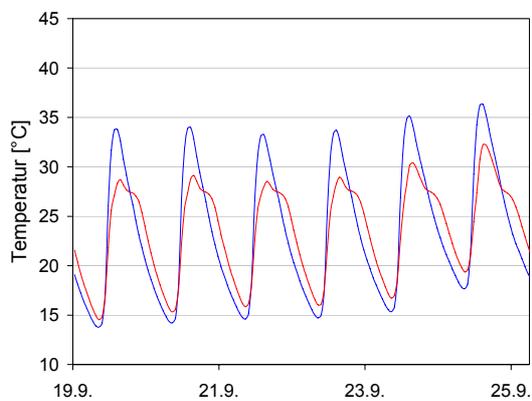


Abb. 7-6: Gemessene Oberflächentemperaturen

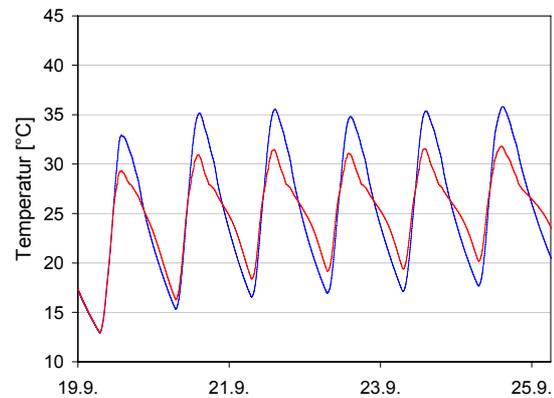


Abb. 7-7: Simulierte Oberflächentemperaturen

3 cm Putz, Blau: Ohne PCM, Rot: mit PCM

Die folgende Abbildungsserie (Abb. 7-8 - 7-11) stellt den Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Raumlufttemperaturen für die Validierungszeiträume dar. Mit einem einzigen identischen Simulationsmodell wurden für die vier Messperioden die unterschiedlichen PCM-Schichtdicken und Lüftungsregime simuliert (Tab. 7-1). Dies bedeutet, dass außer den tatsächlich veränderten Parametern keine zusätzliche Parameteranpassung erfolgte. Dadurch kann das numerische Modell zuverlässig validiert werden [103].

Die in Anhang 9 dargestellten Grafiken zeigen, über den direkten Vergleich Messung ↔ Simulation hinaus, die Einflussgrößen der PCM-Schichtdicke und des Lüftungsverhaltens auf den Temperaturverlauf im Testraum.

Bei der Validierung muss berücksichtigt werden, dass der Temperaturverlauf ohne PCM nicht exakt reproduziert werden kann. In Bezug auf die PCM-Effekte bedeutet das, dass auf einem anderen Temperaturniveau auch andere Effekte zu erwarten sind. Die Messergebnisse aus Abb. 7-10 a wurden zeitweise durch direkte Solarstrahlung auf das Thermoelement verfälscht und manuell korrigiert (gepunktete Linien).

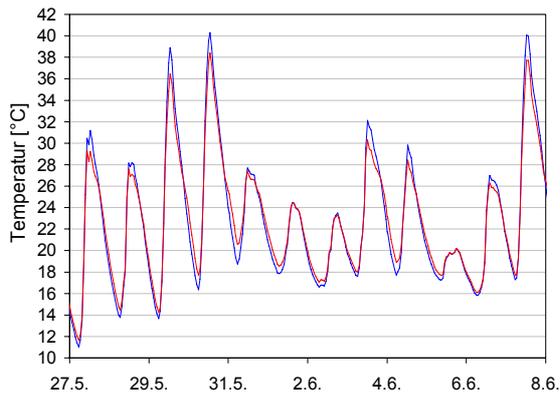


Abb. 7-8a: Gemessene Lufttemperaturen

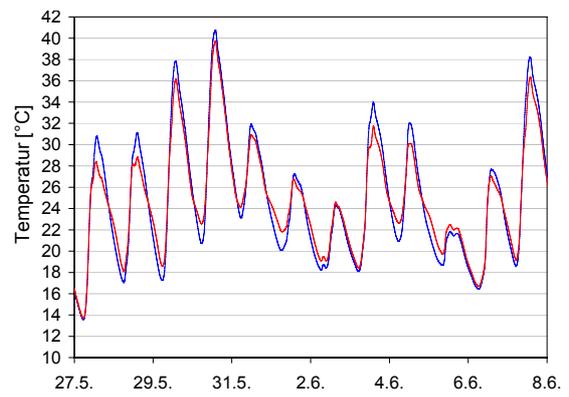


Abb. 7-8b: Simulierte Lufttemperaturen

1 cm Putz, keine mech. Lüftung, Messperiode 1a

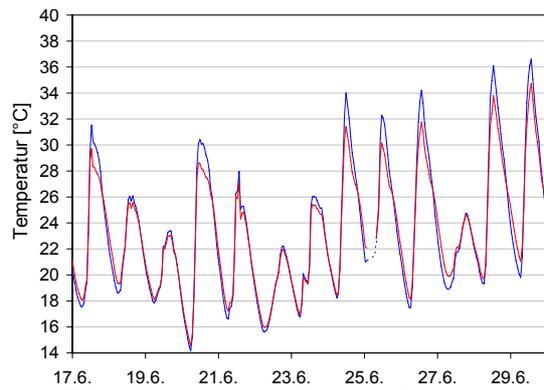


Abb. 7-9a: Gemessene Lufttemperaturen

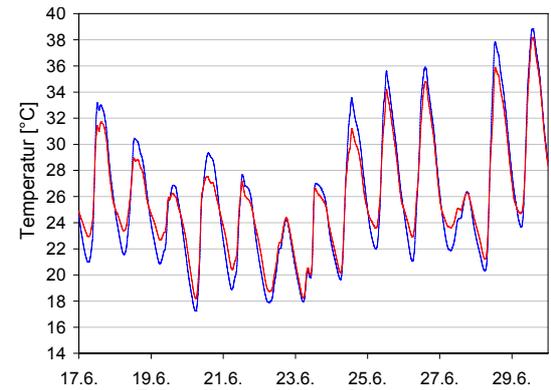


Abb. 7-9b: Simulierte Lufttemperaturen

1 cm Putz, keine mech. Lüftung, Messperiode 1c

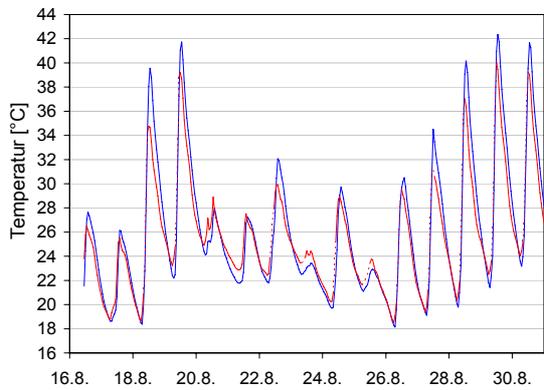


Abb. 7-10a: Gemessene Lufttemperaturen

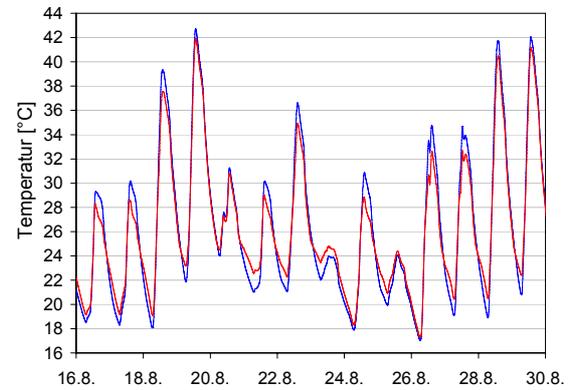


Abb. 7-10b: Simulierte Lufttemperaturen

3 cm Putz, keine mech. Lüftung, Messperiode 3a

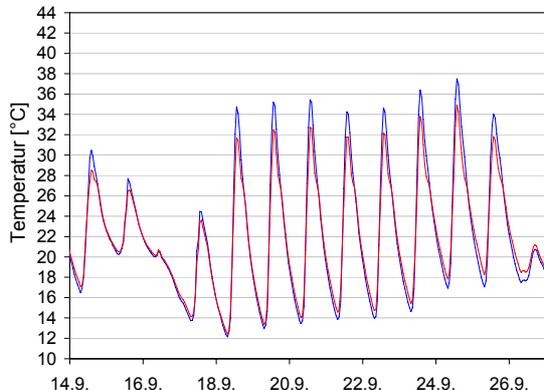


Abb. 7-11a: Gemessene Lufttemperaturen

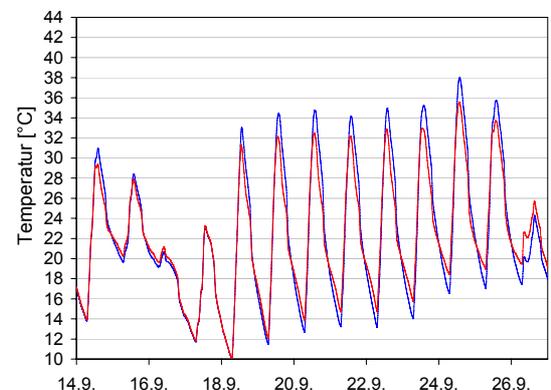


Abb. 7-11b: Simulierte Lufttemperaturen

3 cm Putz, keine mech. Lüftung, Messperiode 3c, Nachtlüftung jeweils von 19 h - 7 h

Blau: Raumlufttemperaturen ohne PCM, Rot: Raumlufttemperaturen mit PCM

7.4 Beurteilung der Validierung

Die Validierung wird als erfolgreich beurteilt. Vier verschiedene Messzeiträume mit unterschiedlichen Klimaverhältnissen und sich verändernder Solargeometrie konnten nachgebildet werden. Die „Fieberkurve“ der einzelnen Messperioden findet sich in den Simulationsergebnissen wieder. Abweichungen treten nur an einzelnen Tagen auf und können u. a. mit Messunsicherheiten erklärt werden.

Als besonders positiv ist die Validierung anzusehen, da dasselbe Simulationsmodell für die verschiedenen Zeiträume und unterschiedlichen PCM-Dicken ähnlich gute Übereinstimmungen zwischen Messung und Simulation ergab. Die Ergebnisse der Messperioden für alle Lüftungsregime und PCM-Dicken sind in Anhang 9 dargestellt. Das Durchlaufen eines kompletten Klimadatensatzes für die vier Perioden, drei Lüftungsregime und unterschiedliche PCM-Dicken verhinderte ein versehentliches fehlerhaftes Anpassen eines Parameters für eine spezielle Situation.

Nicht immer wurde beim Vergleich gemessener und simulierter Temperaturen die beste Übereinstimmung dann erzielt, wenn der Luftvolumenstrom so gewählt wurde, wie in Tab. 7-1 angegeben (Anhang 9).

Die Werte aus Tab. 7-1 stellen Abschätzungen dar, die auf Einzelmessungen mit einem Volumstrommessgerät am Ventilator basieren. Der festgestellte Leistungsabfall des Ventilators erhöht die Ungenauigkeit bei Aussagen über den tatsächlichen Luftwechsel.

Als weitere Einflussgröße ist der Infiltrationsluftwechsel zu nennen, der durch Undichtigkeiten der noch original aus den 1930er Jahren stammenden Industrieverglasung, durch den Türspalt zum Vorraum und durch die rohrförmige Zuluftöffnung in der Brüstung ($\varnothing = 10$ cm) zustande kommt. Insbesondere bei Abschalten der mechanischen Lüftung findet ein nicht messtechnisch erfasster Austausch der Raumluft mit der Außenluft aufgrund von temperaturinduzierten und windbedingten Druckunterschieden statt. Dieser wurde bei der Validierungssimulation pauschal auf 1 V/h gesetzt.

Die hervorragende Übereinstimmung der Raumlufttemperaturen bei der Betrachtung der Messperiode 3c unterstreicht den enormen Einfluss der korrekt behandelten Solarstrahlung. Die klaren Tage 18.9. - 25.9.2005 minimieren Fehler bei der Berechnung der Diffusstrahlung und erlauben eine gute Approximation der gemessenen Globalstrahlung.

Als Problem bei der Validierung der PCM-Modellierung ergibt sich, dass in der Vergleichssimulation das gleiche Temperaturniveau und die gleichen Schwankungen erzielt werden müssen. Nur unter den gleichen thermischen Randbedingungen im Raum, sind die simulierten PCM-Effekte mit den gemessenen zu vergleichen.

7.5 Messergebnisse

Die Messungen in den Versuchsräumen zeigten an Tagen mit Raumlufttemperaturen über 28°C PCM-bedingte Temperaturreduktionen von 1.5 - 2.5 K für eine 1 cm dicke Putzschicht und von 2.5 - 3.5 K für eine 3 cm dicke Putzschicht. Spitzenreduktionen von 3 K für eine Schichtdicke von 1 cm und von 4.5 K für eine Schichtdicke von 3 cm wurden gemessen. Die Oberflächentemperaturen können noch etwas stärker gesenkt werden: Mit einer Putzschichtdicke von 1 cm wurde eine Reduktion von 3.5 K erzielt und mit einer Putzschichtdicke von 3 cm konnte eine maximale Reduktion der Oberflächentemperaturen von 5.0 K gemessen werden.

Die Verbesserung, die durch eine Erhöhung der Putzschichtdicke von 1 cm auf 3 cm, erreicht werden kann, lässt sich trotz fehlender Parallelmessungen im Vergleich der Messergebnisse untereinander und mit den jeweiligen Simulationen glaubhaft abschätzen. In Bezug auf die Spitzentemperaturen ist bei Erhöhung der Schichtdicke nur eine relativ geringe Verbesserung von etwa 1 K möglich. Die Ergebnisse der Temperaturmessungen im Verifikationsobjekt sind in Anhang 10 zu finden.

8 Simulation des Raumklimas mit PCM

Die hier vorgestellten Gebäudesimulationen dienen dazu, Einsatzmöglichkeiten eines PCM-Putzes und Optimierungspotentiale des Materials unter verschiedenen Randbedingungen zu eruieren. Sie wurden mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten, in ESP-r implementierten (Kap. 6) und erfolgreich validierten (Kap. 7) PCM-Modul durchgeführt. Dabei wird das Raumklima mit und ohne PCM berechnet, das sich unter speziellen, in der Simulation angenommenen, Bedingungen einstellt.

Es werden im Folgenden die Ergebnisse verschiedener Parametervariationen vorgestellt. Aufgrund der Vielfalt der Parameter, die die Raumtemperatur beeinflussen, wird hauptsächlich auf so genannte nicht lineare Einflussgrößen eingegangen. Als lineare Einflussgrößen werden an dieser Stelle diejenigen Parameter bezeichnet, die sich in nicht PCM-konditionierten Räumen annähernd direkt proportional auf die maximalen Raumlufttemperaturen auswirken, z.B. die Erhöhung der Fensterfläche oder der Betrieb eines zusätzlichen elektrischen und somit Wärme abgebenden Gerätes.

Als maßgebliche Größe bei der Beurteilung des sommerlichen Wärmeschutzes und der Entscheidungsfindung bezüglich möglicher und sinnvoller Maßnahmen dient, neben der zu einem einzelnen Zeitpunkt auftretenden Maximaltemperatur, die Zeitdauer, an der ein bestimmtes gewünschtes Innenraumklima überschritten wird. Dieses Innenraumklima kann durch die Raumlufttemperatur (z.B. DIN 4108-2) oder durch die operative Temperatur als gekoppelte Oberflächen- und Raumlufttemperatur (z.B. Arbeitsstättenverordnung) definiert werden (s. Kap. 1). Als Zeiteinheit können relative Angaben in Form von % der Aufenthaltsdauer (DIN 4108-2) oder absolute Angaben in Form von Überhitzungsstunden gewählt werden.

Im Folgenden wird die Reduktion der Überhitzungszeit meist in Abhängigkeit von der Anzahl der ohne PCM auftretenden Überhitzungsstunden betrachtet. Auswirkungen von Veränderungen der linearen Einflussgrößen lassen sich somit anhand der vermehrt bzw. weniger häufig auftretenden Überhitzungszeiten nachvollziehen.

8.1 Einflüsse auf das Raumklima

Die Parameter, die das in einem Gebäude entstehende Innenraumklima beeinflussen, sind vielfältig. Architektur, Konstruktion und Nutzung bestimmen im Zusammenspiel mit den klimatischen Einflüssen die Raumtemperaturen, die sich – unter der Voraussetzung, dass auf den Einsatz von Anlagentechnik verzichtet wird – ergeben [104]. Der Solareintrag in das Gebäude oder durch Nutzung entstehende interne Lasten wirken sich direkt auf Maximaltemperaturen und Überhitzungszeiten aus. Die thermische Trägheit eines Gebäudes bestimmt, inwieweit Wärmeeinträge im Gebäude gespeichert und somit bestimmte Spitzenereignisse gepuffert werden können. Die Art der Lüftung und die Höhe des Luftwechsels sind insbesondere im Zusammenhang mit der vorhandenen thermischen Masse von großer Bedeutung.

8.1.1 Solareintrag

Der Solareintrag in einen Raum wird außer durch die bodennah zur Verfügung stehende Strahlungsintensität durch verschiedene bauliche Parameter bestimmt. Die auf eine Fläche auftreffende Globalstrahlung besteht aus einem Anteil direkter, gerichteter Strahlung und einem Anteil nicht gerichteter, diffuser Strahlung. Die Diffusstrahlung setzt sich aus der diffusen Himmelsstrahlung und der von der Umgebung reflektierten Direktstrahlung zusammen. Unter Annahme eines isotropen Strah-

lungsmodells wird von einer gleichmäßigen Verteilung der diffusen Himmelsstrahlung über den Himmelshalbraum ausgegangen. Das für die in Kap. 8 vorgestellten Simulationsergebnisse verwendete Perez-Modell berücksichtigt darüber hinaus die zirkumsolare Diffusstrahlung, die das verstärkte Auftreten von Diffusstrahlung rund um den Direktstrahl der Sonne berücksichtigt, und die diffuse Horizontstrahlung, die auf die Erdkrümmung zurückzuführen ist [105]. Soweit Direkt- und Diffusstrahlung nicht einzeln gemessen werden können, sind für die rechnerische Aufteilung der Globalstrahlung nicht nur die geometrischen Kenntnisse des Sonnenstands für einen konkreten geographischen Ort nötig, sondern auch auf empirischen Untersuchungen basierendes meteorologisches Wissen (s. Kap. 6.3).

Für den durch transparente Flächen transmittierten Solareintrag ist das Wissen um die Aufteilung von gerichteter und ungerichteter Strahlung dann wichtig, wenn bei der numerischen Berechnung wie im Falle von ESP-r winkelabhängige Transmissionskoeffizienten benutzt werden. Die Direktstrahlung gelangt entsprechend dem ihrem Einfallswinkel zugeordneten Transmissionsgrad in das Rauminnere. Der Diffusstrahlung wird ein gemittelter Einfallswinkel von 51° zugewiesen, der einem Mittelwert bei anisotropischen Verhältnissen entspricht [93]. Neben den thermischen und optischen Parametern eines transparenten Bauteils ist die zum primären Wärmetransport (Transmission der Strahlung) und zum sekundären Wärmetransport (Absorption und Wärmeleitung) zur Verfügung stehende Fläche von Bedeutung. Wie lange und unter welchen Einfallswinkeln eine Fläche direkt von der Sonne beschienen wird, hängt neben dem geographischen Standort und den vorherrschenden Witterungsverhältnissen von der Orientierung des Gebäudes ab. Dabei können Vor- und Rücksprünge und Nachbarbebauungen als passive Verschattung dienen. Diffuse Strahlung trifft unabhängig von Orientierung und baulichen Verschattungen gleichmäßig auf Außenbauteile.

8.1.2 Wärmeübergang

Der konvektive Wärmeübergang zwischen innenliegenden Bauteiloberflächen und Raumluft beeinflusst das sich einstellende Raumklima unter sommerlichen Bedingungen maßgeblich. Er bestimmt unter anderem, wie schnell und zu welchem Grad sich die an der Oberfläche absorbierten Solareinträge und der PCM-Effekt der entsprechend konditionierten Innenbauteile auf die Raumlufttemperatur auswirken.

Für die Bestimmung eines konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten gibt es unterschiedliche Methoden, die sich durch ihren Detaillierungsgrad unterscheiden. Sie reichen von der zeitaufwändigen, komplexen Modellierung in CFD-Programmen bis zur Annahme globaler Wärmeübergangskoeffizienten, die gleichzeitig vereinfacht den langwelligen Strahlungsaustausch der betrachteten Flächen beinhalten.

Das Gebäudesimulationsprogramm ESP-r bietet dem Nutzer die Möglichkeit, aus verschiedenen empirischen Näherungen auszuwählen. Allen diesen Methoden liegt die Annahme einer uniformen Raumtemperatur zugrunde; es wird also keine Temperaturschichtung im Raum berücksichtigt.

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationen wurde zur Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten die Näherungsgleichung von [21] verwendet. Diese geht von konstanten Materialeigenschaften der Raumluft aus und beschreibt den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten gemäß Gl. 8-1 mit empirischen Koeffizienten a , p , m , b und q .

$$h_c = \left[\left\{ a \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^p \right\}^m + \left\{ b (\Delta T)^q \right\}^m \right]^{1/m} \quad [8-1]$$

Die charakteristische Länge L entspricht im Falle von vertikalen Flächen der Raumhöhe und im Falle von horizontalen Flächen der Quadratwurzel aus der Fläche. Die empirischen Koeffizienten variieren entsprechend der Ausrichtung der betrachteten Fläche.

Neben dem konvektiven Wärmeübergang beeinflusst der langwellige Strahlungsaustausch und die solare Oberflächenabsorption die Oberflächentemperatur von Decke, Boden und Innenwänden.

ESP-r berechnet anhand von Orientierung und Neigung der transparenten Fläche und dem aktuellen Sonnenstand diejenigen raumumschließenden Bauteile, die direkt von der Sonne beschienen werden. Soweit keine feinere Einteilung der Bauteilflächen vorgenommen wurde, wird die auftreffende Strahlung auf die gesamte Wand- bzw. Bodenfläche umgeschlagen und mit dem solaren Oberflächenabsorptionskoeffizienten multipliziert.

Im Gegensatz zu vielen anderen Gebäudesimulationsprogrammen, in denen ein einziger Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion und Strahlung berechnet wird, berücksichtigt ESP-r den physikalischen Vorgang der langwelligen Wärmestrahlung von Oberflächen. Entsprechend der vorhandenen Oberflächentemperaturen wird der Strahlungsaustausch eines Bauteils mit seinen Umgebungsflächen über die geometriebedingte Einstrahlzahl und die jeweiligen Emissionskoeffizienten bestimmt (Kap. 2.1, Gl. 2-1).

In den nachfolgend dargestellten Simulationsergebnissen wurde der Absorptionskoeffizient für solare Oberflächenabsorption des PCM-Putzes mit $\alpha = 0.5$ angenommen; der Emissionskoeffizient für langwelligen Strahlungsaustausch wurde auf $\varepsilon = 0.9$ gesetzt.

8.1.3 Klimadatensätze

Die Bedeutung der in der Gebäudesimulation verwendeten Klimadaten, unabhängig von der Anwendung von PCM, wird in [10] herausgestellt. Abhängig davon, welche Klima-Files verwendet werden, können Abweichungen der ermittelten Überhitzungsstunden in einem Raum von bis zu 15 % auftreten. Um dieser Unsicherheit zu begegnen, wurden für die in Kap. 8 vorgestellten Simulationsergebnisse unterschiedliche Klimafiles verwendet [106, 107, 108]. Ihre Beschreibung inklusive der Darstellung der jeweiligen Maximal-, Minimal- und Mitteltemperaturen und der Globalstrahlung der Sommermonate ist in Anhang 11 zu finden.

8.2 Optimierung des PCM

8.2.1 Peak-Temperatur

Voraussetzung für den effektiven Einsatz von PCM ist, die für die jeweilige Problemstellung geeignete Temperatur des Phasenübergangs zu identifizieren. Im Folgenden wird die Variation des Phasenübergangsbereich durch den Parameter θ_2 (Peak-Temperatur des exponentiell approximierten, kontinuierlichen Phasenübergangsbereichs $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$, s. Kap. 3) dargestellt.

Zur Untersuchung der geeigneten Peak-Temperatur für die Anwendung von PCM-Putz in einem durchschnittlichen Büro wird ein Zellenbüro in Gipskartonständerbauweise mit 80 % Fensterflächenanteil (Wärmeschutzverglasung $U = 1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 0.6$) simuliert. Ein kontinuierlicher Luftwechsel mit einer Luftwechselrate von 2 h^{-1} wird angenommen, außenliegender Sonnenschutz ist nicht vorhanden. Der PCM-Putz wird an den Innenwänden und der Decke angebracht (Gesamtfläche $A = 46 \text{ m}^2$). Die Putzschichtdicke wird variiert und unterschiedliche Klimafilas (Nr. 3 und 4 gemäß Anhang 11) werden verwendet.

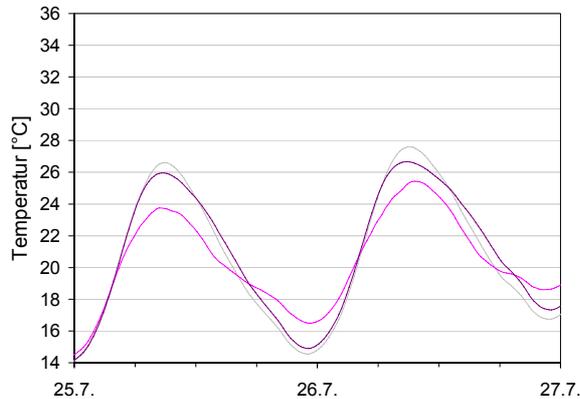


Abb. 8-1: 1 cm PCM-Putz

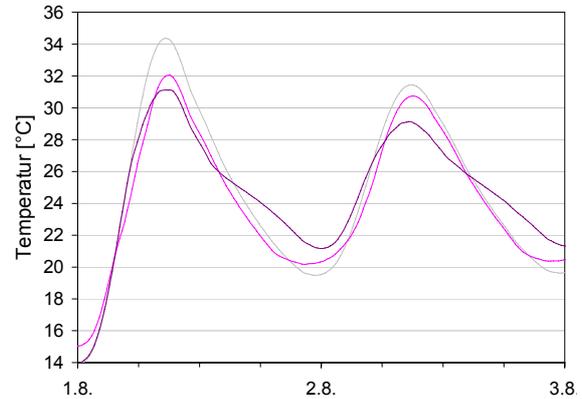


Abb. 8-2: 1 cm PCM-Putz

Raumlufttemperaturverlauf bei unterschiedlichen Peak-Temperaturen θ_2

Grau: Raumlufttemperatur ohne PCM

Pink: Raumlufttemperatur mit PCM, $\theta_2 = 22^\circ\text{C}$

Violett: Raumlufttemperatur mit PCM, $\theta_2 = 28^\circ\text{C}$

Abb. 8-1 und Abb. 8-2 zeigen Raumtemperaturverläufe ohne PCM (grau) und mit PCM für jeweils zwei verschiedene Peak-Temperaturen. Das unterschiedliche Temperaturniveau der betrachteten Tage zeigt die Bedeutung des Phasenübergangsbereichs. Bei Raumlufttemperaturen ohne PCM zwischen 26°C und 28°C , wie in Abb. 8-1 zu sehen, bringt eine Peak-Temperatur $\theta_2 = 22^\circ\text{C}$ optimale Ergebnisse. Die nächtlichen Temperaturen sind für die Erstarrung eines maßgeblichen Prozentsatzes der Latentwärme ausreichend niedrig. Bei Temperaturen über 30°C (Abb. 8-2) bringt das PCM mit niedrigerer Peak-Temperatur nur am ersten Tag eine effektive Reduktion, da es aufgrund der vorhergehenden tiefen Nachttemperaturen annähernd erstarrt ist. Am zweiten Tag kann das PCM mit Peak-Temperatur $\theta_2 = 22^\circ\text{C}$ im Gegensatz zum PCM mit höherer Phasenübergangstemperatur nicht mehr entladen werden. Für die Temperaturen über 30°C erzielt deshalb das PCM mit Peak-Temperatur $\theta_2 = 28^\circ\text{C}$ bessere Ergebnisse.

In Abb. 8-3 - 8-6 sind Überhitzungsstunden mit unterschiedlichen Grenztemperaturen θ_{Grenz} dargestellt. Die Überhitzungsstunden kennzeichnen die Dauer, während der die Raumlufttemperatur die jeweilige Grenztemperatur im Laufe eines Jahres überschreitet. Die Grenztemperaturen 25°C (rot), 26°C (grün) und 27°C (blau) entsprechen den Grenzwerten der DIN 4108-2 für unterschiedliche Klimaregionen; die Grenztemperatur 28°C markiert die relative Grenze des thermisch behaglichen Bereichs [19].

Es wurde die Raumlufttemperatur bei Verwendung acht verschiedener PCM-Putze (spezifische Latentwärme jeweils $l = 16.5 \text{ kJ/kg}$), die sich durch ihre Peak-Temperatur θ_2 unterscheiden, berechnet. Die Peak-Temperatur wurde in 1 K Schritten variiert und ist auf der Abszisse aufgetragen.

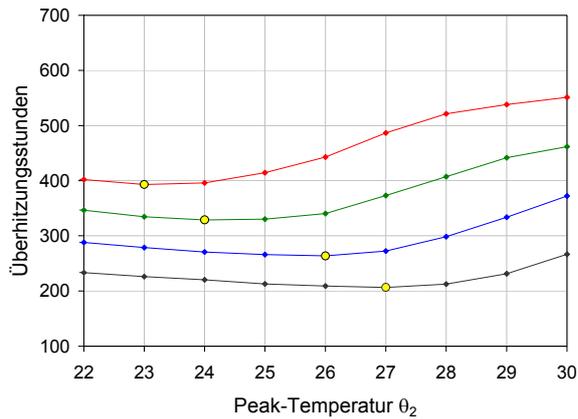


Abb. 8-3: 1 cm PCM-Putz

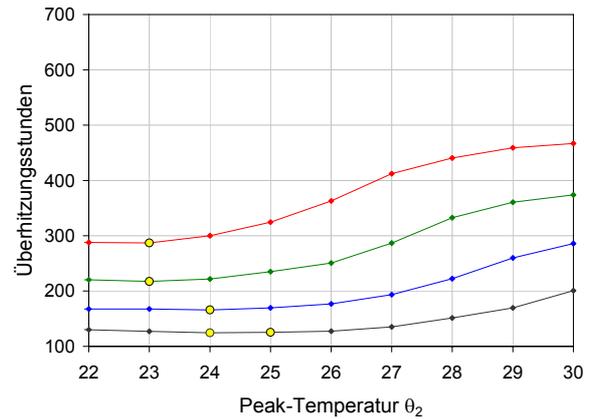


Abb. 8-4: 3 cm PCM-Putz

Überheizungsstunden bei unterschiedlichen Peak-Temperaturen θ_2 , Klimafile 3

Grenztemperatur der Überheizungsstunden:

Rot: $\theta_{Grenz} = 25^\circ\text{C}$, Grün: $\theta_{Grenz} = 26^\circ\text{C}$, Blau: $\theta_{Grenz} = 27^\circ\text{C}$, Schwarz: $\theta_{Grenz} = 28^\circ\text{C}$

Gelbe Markierung: Minimum an Überheizungsstunden

Für unterschiedliche Grenztemperaturen ist ein Optimum, d.h. ein Minimum an Überheizungsstunden, erkennbar. Die gelben Kreise markieren die optimalen Werte für θ_2 bei verschiedenen Grenztemperaturen. Erkennbar ist ein deutlicher Anstieg der Überheizung zu hohen Peak-Temperaturen hin.

Zu niedrige Peak-Temperaturen führen dazu, dass der Phasenübergangsbereich sehr häufig überschritten wird und die maximalen Temperaturen im Raum dann auftreten, wenn das PCM schon seit längerer Zeit flüssig ist. Die Temperaturkurve an der Oberfläche des PCM-Bauteils folgt dann stärker den Werten des Vergleichsraums ohne PCM, da der konvektive Wärmeübergang durch die Temperaturdifferenz zwischen Raumluft und Oberfläche bestimmt wird. Bei zu niedrig gewählten Phasenübergangsbereichen sind die nächtlichen Raumlufttemperaturen zudem häufig nicht tief genug, um die Erstarrung des PCM zu gewährleisten.

Bei zu hohen Peak-Temperaturen wird der Phasenübergangsbereich häufig nicht oder nur teilweise durchlaufen. Dadurch kann nur ein Teil der Latentwärmespeicherfähigkeit des Materials genutzt werden und die erzielbaren Temperaturreduktionen fallen geringer aus.

Bei dünnen PCM-Schichten sollte die Peak-Temperatur etwas höher liegen, damit der Phasenübergangsbereich nicht zu früh überschritten wird. Bei dickeren PCM-Schichten können die tieferen Schichten besser genutzt werden, wenn θ_2 etwas tiefer gewählt wird. Die Soll-Peak-Temperatur bei einem PCM-Putz, der ansonsten die thermischen Eigenschaften des untersuchten Putzes (s. Tab. 3-3) aufweist, liegt bei einer 1 cm dicken Putzschicht 1 - 2 K unter der anvisierten Grenztemperatur; bei einer 3 cm dicken PCM-Schicht sollte die Grenztemperatur um 2 - 3 K unterschritten werden.

Für Bedingungen, unter denen in dem betrachteten Raum noch häufiger der Bereich des thermischen Komforts überschritten wird (s. Abb. 8-5 und 8-6), kann diese Empfehlung übernommen werden, wobei bei höheren Außentemperaturen tendenziell etwas höhere Peak-Temperaturen gewählt werden sollten, um maximale PCM-Effekte zu erzielen.

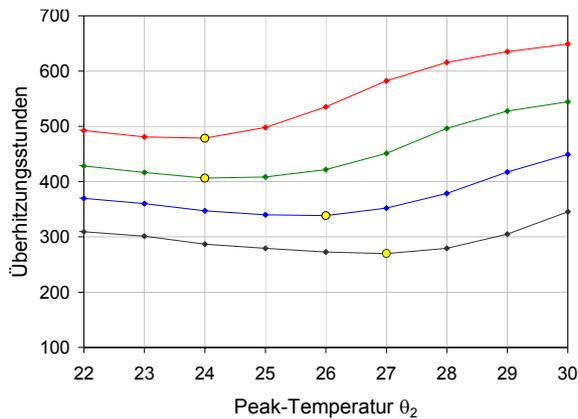


Abb. 8-5: 1 cm PCM-Putz

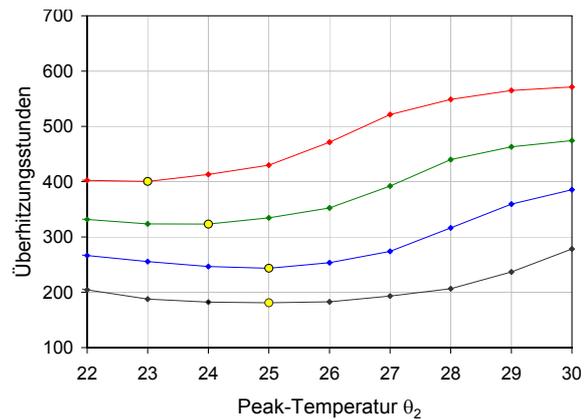


Abb. 8-6: 3 cm PCM-Putz

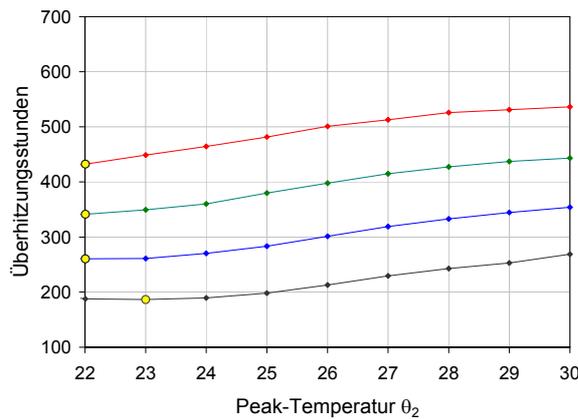


Abb. 8-7: Makroelement: 0,25 m³ Salzhydrat gemäß Tab. 3-1

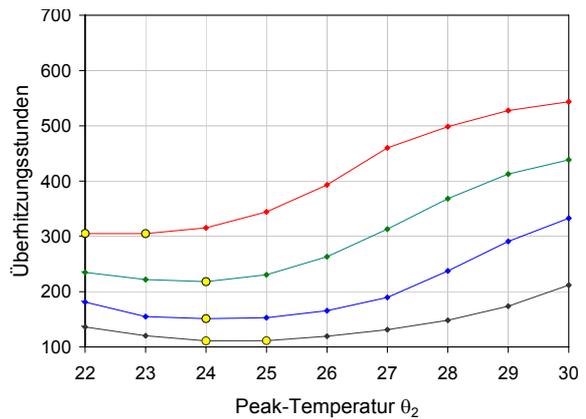


Abb. 8-8: 2 cm PCM-Putz + Makroelement

Überheizungsstunden bei unterschiedlichen Peak-Temperaturen θ_2 , Klimafile 4

Grenztemperatur der Überheizungsstunden:

Rot: $\theta_{Grenz} = 25^\circ\text{C}$, Grün: $\theta_{Grenz} = 26^\circ\text{C}$, Blau: $\theta_{Grenz} = 27^\circ\text{C}$, Schwarz: $\theta_{Grenz} = 28^\circ\text{C}$

Gelbe Markierung: Minimum an Überheizungsstunden

8.2.2 Latentwärme

Der PCM-Putz weist mit $l = 16.5 \text{ kJ/kg}$ eine relativ geringe spezifische Schmelzwärme auf. Aufgrund der Anwendung als Innenputz verfügt er jedoch im Raum über eine große nutzbare Fläche an Wänden und Decken. PCM mit höherer Latentwärmespeicherkapazität, wie z.B. Salzhydrate, müssen, da Mikroverkapselung meist nicht möglich ist, als Makroelemente in den Raum eingebracht werden. Sie werden zweckmäßig an der Decke oder anderen frei liegenden, ungenutzten Flächen befestigt.

Zur Untersuchung der Effekte bei höheren spezifischen Latentwärmern, wird die Betrachtung aus Kap. 8.2.1 nun für ein PCM durchgeführt, das in einem $0,25 \text{ m}^3$ einschließenden Makroelement ($d = 2 \text{ cm}$) an der Decke angebracht ist (Abb. 8-7). Die spezifische Latentwärme beträgt $l = 172 \text{ kJ/kg}$ und die Materialeigenschaften entsprechen denen des modifizierten Calcium-Chlorid-Hexahydrats aus Tab. 3-4. Die Makroelementhülle wird dabei thermisch nicht berücksichtigt. Aufgrund der hohen spezifischen Schmelzwärme wird der Phasenübergangsbereich im PCM nur selten überschritten. Die beste Ausnutzung der Latentwärmespeicherfähigkeit erfolgt daher bei niedrigen Peak-Temperaturen, da diese eine höhere prozentuale Umsetzung der Latentwärme ermöglichen. Bei der Kombination von PCM-Makroelementen ($l = 172 \text{ kJ/kg}$) an der Decke und einer 2 cm dicken PCM-Putzschicht ($l = 16.5 \text{ kJ/kg}$) an den Innenwänden (Abb. 8-8) ergibt sich die optimale Peak-Temperatur mit Überheizungsminima bei $22^\circ\text{C} \leq \theta_2 \leq 25^\circ\text{C}$.

8.2.3 Wärmeleitfähigkeit

Die Untersuchungen zur Optimierung der Wärmeleitfähigkeit aus Kap. 5-3 anhand des Kriteriums OF-TAV ergaben eine zweckmäßige Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit ab einer Schichtdicke von 4 cm (bei einer spezifischen Latentwärme von $l = 25 \text{ kJ/kg}$) bzw. ab einer Schichtdicke von 2 - 3 cm (bei einer spezifischen Latentwärme von $l = 50 \text{ kJ/kg}$). Für die Betrachtung eines mit PCM-Putz konditionierten Büroraumes in Leichtbauweise (Raumtyp L gemäß VDI 2078, s. Anhang 12) unter sommerlichen Verhältnissen bestätigt sich die These, dass erst ab einer gewissen Schichtdicke eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit Wirkung zeigt. In Abb. 8-9 - Abb. 8-12 sind Raumlufttemperaturen zu sehen, die sich für den betrachteten PCM-Putz mit $\theta_2 = 28^\circ\text{C}$ bei unterschiedlichen Werten für die Wärmeleitfähigkeit ergeben.

Im Falle der in Abb. 8-9 und Abb. 8-10 dargestellten Putzschichtdicken von 1 und 2 cm bringt eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit keine Vorteile.

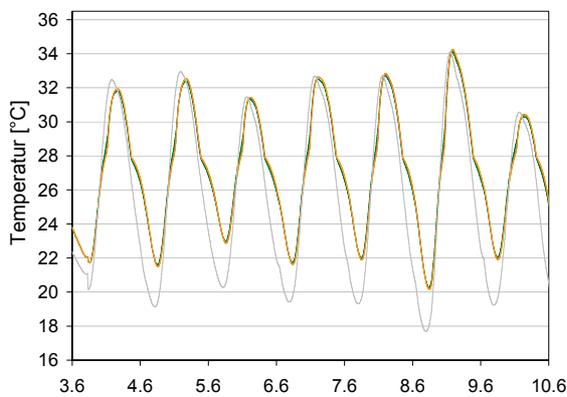


Abb. 8-9: Raumluft bei 1 cm Putzschichtdicke

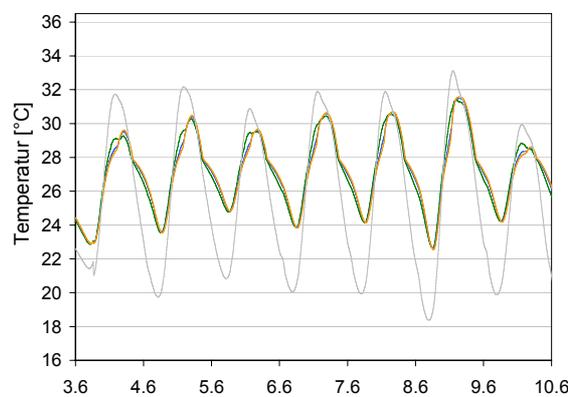


Abb. 8-10: Raumluft bei 2 cm Putzschichtdicke

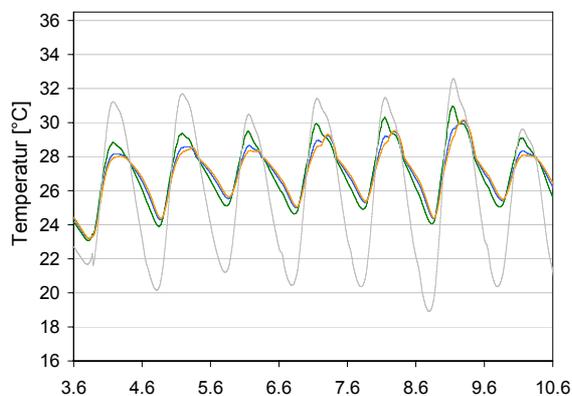


Abb. 8-11: Raumluft bei 3 cm Putzschichtdicke

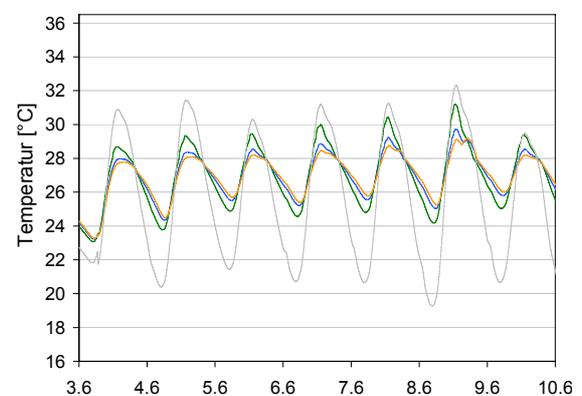


Abb. 8-12: Raumluft bei 4 cm Putzschichtdicke

Variation der Wärmeleitfähigkeit: Grün: $\lambda = 0.21 \text{ W/mK}$, Blau: $\lambda = 0.42 \text{ W/mK}$, Orange: $\lambda = 0.63 \text{ W/mK}$
 Grau: Raumlufttemperatur ohne PCM

Positive Effekte durch eine höhere Wärmeleitfähigkeit zeigen sich ab einer Schichtdicke von 3 cm (Abb. 8-11). Bei einer 4 cm dicken PCM-Schicht (Abb. 8-12) führt die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Putzes von $\lambda = 0.21 \text{ W/mK}$ (grün) auf $\lambda = 0.63 \text{ W/mK}$ (orange) zu einer durchgängigen Reduktion der Raumlufttemperaturen um 2.5 - 3.5 K gegenüber dem herkömmlichen Putz ohne PCM während der betrachteten siebentägigen Hitzeperiode.

Eine entsprechende Wärmeleitfähigkeit ist also zur Ausnutzung größerer Schichtdicken im Falle längerer Hitzeperioden unabdingbar. Bei geringer Wärmeleitfähigkeit können die tiefer liegenden Schichten nicht aktiviert werden.

8.2.4 Schichtdicke des PCM

Abb. 8-13 und 8-14 stellen Überheizungsstunden für einen herkömmlichen Büroraum in Leichtbauweise (interne Lasten gemäß DIN 4108-2, Luftwechselrate 2 h^{-1}) bei unterschiedlichen PCM-Schichtdicken dar. Als Vergleichswert dienen dabei die Überheizungsstunden, die bei Verwendung eines herkömmlichen Gipsputzes bei einer Auftragsstärke von 1 cm auftreten.

Die Reduktion an Überheizungsstunden, die im Falle einer Erhöhung der PCM-Putzschichtdicke von 1 cm auf 2, 3, 4 und 5 cm erzielt wird, ist relativ unabhängig von der gewählten Peak-Temperatur. Auffällig ist, dass nur bis zu einer Putzschichtdicke von 3 cm signifikante Verbesserungen aufgrund von größeren Schichtdicken bemerkbar sind.

Vergleicht man eine 3 cm dicke PCM-Putzschicht bei $\theta_2 = 28^\circ\text{C}$ mit einer 1 cm dicken PCM-Putzschicht bei $\theta_2 = 26^\circ\text{C}$ in Hinblick auf die Reduktion der Stunden über 25°C und 26°C wird ersichtlich, dass eine Optimierung der Phasenübergangstemperatur Verbesserungen der gleichen Größenordnung hervorbringt, wie eine Verdreifachung der Schichtdicke.

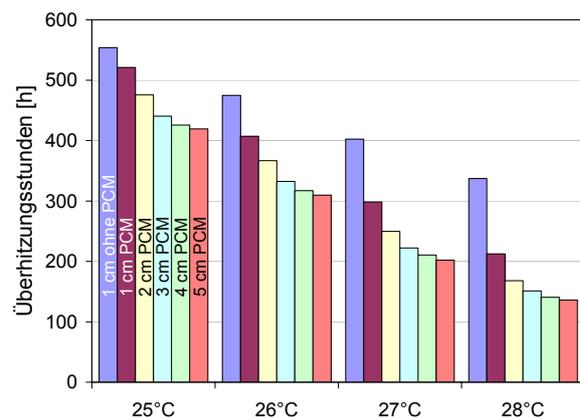


Abb. 8-13: Peak-Temperatur $\theta_2 = 28^\circ\text{C}$

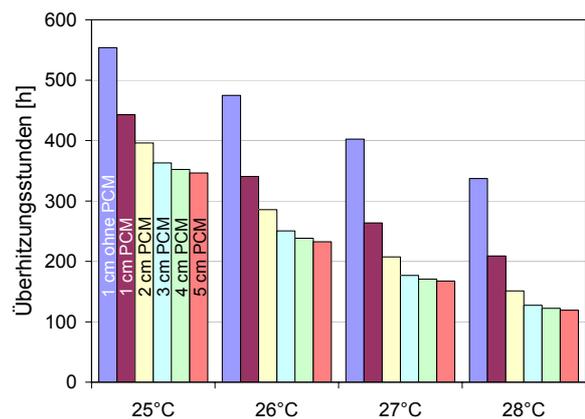


Abb. 8-14: Peak-Temperatur $\theta_2 = 26^\circ\text{C}$

Überheizungsstunden für süd-orientiertes Zellenbüro (Raumtyp XL gemäß VDI 2078, Anhang 12)
Grenztemperaturen der Überheizungsstunden $\theta_{\text{Grenz}} = 25^\circ\text{C}, 26^\circ\text{C}, 27^\circ\text{C}$ und 28°C

Abb. 8-15 und Abb. 8-16 zeigen, dass eine Erhöhung der Putzschichtdicke auf Werte $d > 3 \text{ cm}$ auch während einer längeren Hitzeperiode, bei der die Raumlufttemperatur häufig Werte über der Peak-Temperatur $\theta_2 = 28^\circ\text{C}$ erreicht, für den betrachteten PCM-Putz nicht empfehlenswert ist. Zu sehen sind Raumlufttemperaturen bei Schichtdicken von 3 cm (Abb. 8-15) und 4 cm (Abb. 8-16) jeweils mit und ohne PCM.

Da die Raumlufttemperatur mit PCM während der betrachteten Tage insgesamt auf einem höheren Temperaturniveau bleibt, kann das PCM in den Nachtstunden nicht entladen werden. Der Wärmespeichereffekt führt dazu, dass der Raum durch die vorher gespeicherte Wärme „warmgehalten“ wird.

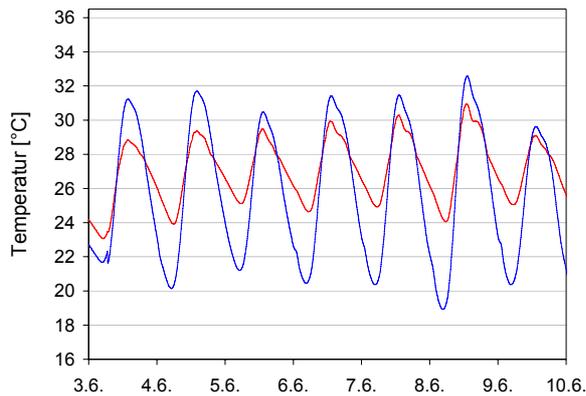


Abb. 8-15: Putzschichtdicke 3 cm

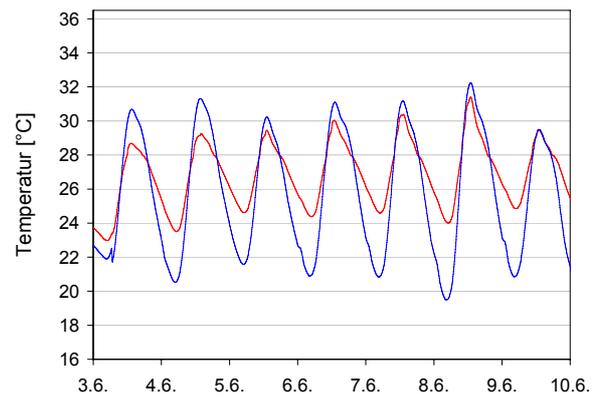


Abb. 8-16: Putzschichtdicke 4 cm

Raumlufttemperaturen: Blau: Ohne PCM; Rot: Mit PCM

8.3 Nutzungsverhalten

8.3.1 Lüftung

Der beträchtliche Einfluss des Luftwechsels auf die thermischen Verhältnisse in einem Raum ist bekannt. Aus energetischen Gründen hat im Winterfall die Minimierung des Luftwechsels auf das hygienisch notwendige Maß (zur Deckung des Sauerstoffbedarfs und zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung) Priorität. Im Sommer ist die Problematik komplexer. In relativ kühlen Räumen (z.B. bei Nordorientierung, schwerer Bauweise, effektiver Verschattung) sollte während des Tages nur minimal gelüftet werden, um nicht die kühlere Raumluft durch wärmere Außenluft zu ersetzen. In den für die Anwendung von PCM betrachteten Fällen mit Überhitzungsproblemen im Sommer steigt aufgrund der einfallenden Solarstrahlung und den internen Lasten dagegen meist die Raumlufttemperatur über die Außentemperatur. In diesen Fällen ist ein Luftaustausch der warmen Raumluft mit der kühleren Außenluft von Vorteil.

Abb. 8-17 bis 8-20 zeigen die Reduktion, die durch eine 2 cm dicke PCM-Putzschicht in einem Büroraum (Raumtyp L) bei unterschiedlich hohen Luftwechselraten und verschiedenen Peak-Temperaturen zu erzielen ist. Dabei sind die Überhitzungsstunden, die ohne Anwendung eines PCM-Putzes auftreten würden, als schwarze Linie auf der Sekundärachse aufgetragen. Mit zunehmendem Luftwechsel sinken die Überhitzungsstunden ohne PCM, da die Außentemperatur unter der sich einstellenden Raumlufttemperatur liegt.

Es ist ersichtlich, dass bei abnehmenden Überhitzungsstunden ohne PCM aufgrund des höheren Luftwechsels auch die Effizienz des PCM etwas sinkt. Dass dieser Effekt umso größer ist, je höher die Peak-Temperatur des Phasenübergangs liegt, ist damit zu erklären, dass die Anzahl der Überhitzungsstunden mit hohen Grenztemperaturen auch ohne PCM bereits deutlich durch den hohen Luftwechsel gesenkt werden konnte.

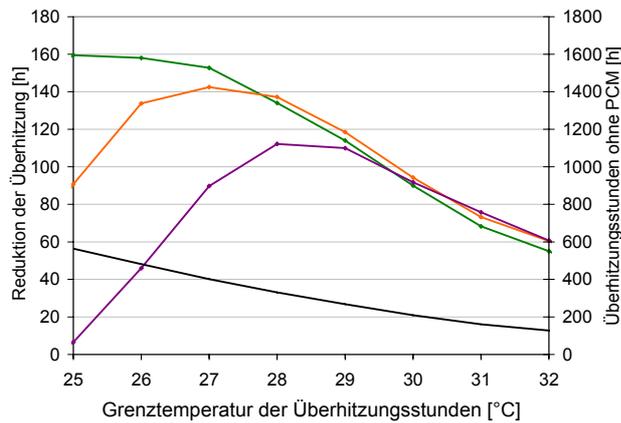


Abb. 8-17: Einfacher Luftwechsel

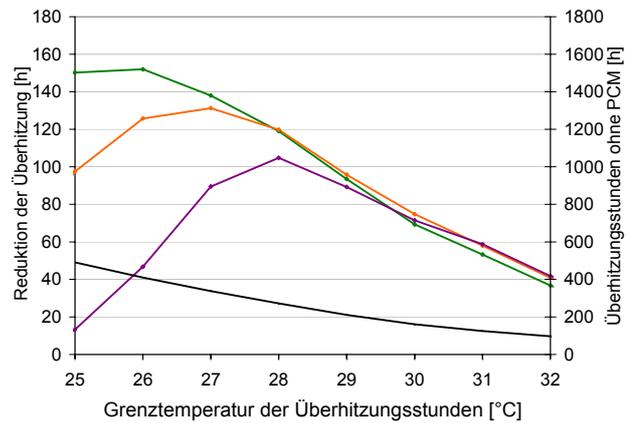


Abb. 8-18: Zweifacher Luftwechsel

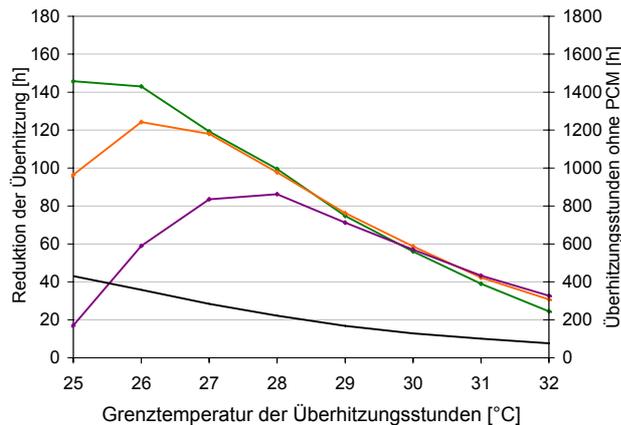


Abb. 8-19: Dreifacher Luftwechsel

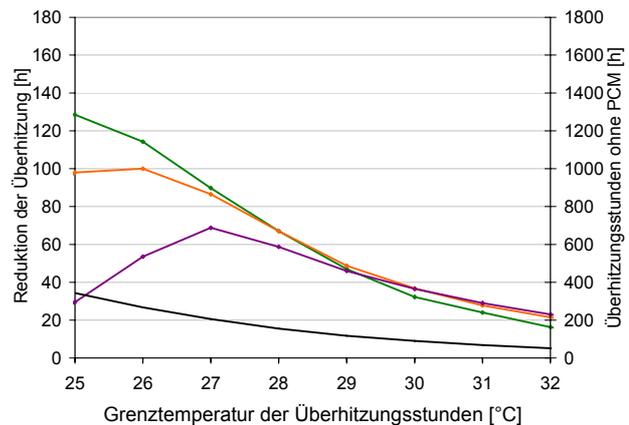


Abb. 8-20: Fünffacher Luftwechsel

Reduktion der Überheizungsstunden für ein süd-orientiertes Büro (Raumtyp L), Putzschichtdicke 2 cm in Abhängigkeit von der Grenztemperatur der Überheizungsstunden

Schwarz (Sekundärachse re. Seite): Überheizungsstunden, die im Raum ohne PCM auftreten

Grün: Reduktion der Überheizungsstunden bei einer Peak-Temperatur $\theta_2 = 24^\circ\text{C}$

Orange: Reduktion der Überheizungsstunden bei einer Peak-Temperatur $\theta_2 = 26^\circ\text{C}$

Violett: Reduktion der Überheizungsstunden bei einer Peak-Temperatur $\theta_2 = 28^\circ\text{C}$

Bei der sehr hohen Luftwechselrate von 5 h^{-1} (5 Luftvolumen des Raumes werden pro Stunde mit der Außenluft ausgetauscht) sinkt die durch PCM erzielbare Reduktion deutlich. Luftwechselraten von 5 h^{-1} sind allerdings aufgrund der hohen auftretenden Luftgeschwindigkeiten bei Anwesenheit von Personen nicht zu empfehlen.

Die Gefahr von Zugerscheinungen beschränkt die Erhöhung des Luftwechsels auf maximale Luftwechselraten von $2 - 3\text{ h}^{-1}$. Wenn Räume nur tagsüber genutzt werden, ist daher eine erhöhte Nachtlüftung sinnvoll. Die thermische Masse des Raumes kann in diesem Fall durch vermehrten konvektiven Wärmeübergang mit der kühlen Außenluft nachts abgekühlt und somit tagsüber effektiver als Wärmespeicher genutzt zu werden. Nachtlüftung ist umso effizienter, je mehr Speichermasse vorhanden ist. Wird ein PCM-Putz verwendet, verfügen auch konventionelle Leichtbauten über eine signifikante thermische Masse.

Die Ergebnisse aus Kap. 8.2 stellen die Bedeutung der Entladung des PCM während der Nacht für eine wirksame Temperaturreduktion heraus. Erhöhte Nachtlüftung bei PCM führt im Idealfall also

nicht nur zur vermehrten sensiblen Wärmespeicherung, sondern vor allem zu einer besseren Ausnutzung der Latentwärmespeicherkapazität.

Auf Grundlage der Simulation der Testräume mit dem Validierungsklimadatensatz (Kap 7.1) wurde die Effizienz eines 3 cm dicken PCM-Putzes zur Reduktion von Überheizungszeiten bei verschiedenen Lüftungsregime ausgewertet. Als Grundlüftung wird eine einfache Luftwechselrate angenommen.

Die Reduktion, die ohne Einsatz eines PCM-Putzes durch leicht erhöhte Nachtlüftung erzielt werden kann, ist insbesondere bei niedrigeren Außentemperaturen bedeutend. Durch Nachtlüftung kann relativ häufig vermieden werden, dass es überhaupt zu Überhitzung kommt. An besonders heißen Tagen können jedoch ohne PCM die Temperaturspitzen nicht gekappt werden. Eine erhöhte Nachtlüftung mit zweifacher Luftwechselrate und Einsatz von PCM bringt für den betrachteten Raum bessere Ergebnisse als eine weitere Erhöhung des Luftwechsels ohne PCM. Aus energetischen Gründen ist zudem zu bedenken, dass hohe Luftvolumenströme der Lüftungsanlage einen höheren Energiebedarf bedeuten.

REDUKTION AN ÜBERHEIZUNGSSTUNDEN [%]	Grundlüftung mit einfachem Luftwechsel von 0 h - 24 h	Grundlüftung mit einfachem Luftwechsel von 7 h – 19 h			
		Zweifacher Luftwechsel von 19 h - 7 h ohne PCM	Zweifacher Luftwechsel von 19 h - 7 h mit PCM	Vierfacher Luftwechsel von 19 h - 7 h ohne PCM	Vierfacher Luftwechsel von 19 h - 7 h mit PCM
Grenztemperatur der Überheizungsstunden [°C]	mit PCM				
26	6.1	16.0	24.6	30.9	34.6
27	9.4	14.7	28.8	30.9	38.9
28	12.1	16.4	33.0	31.6	41.9
30	16.1	16.4	38.2	32.3	49.3

Tab. 8-1: Simulationsergebnis: Reduktion der Überheizungsstunden im Testraum durch Einsatz von PCM und / oder erhöhter Nachtlüftung – Prozentuale Reduktion gegenüber einer Grundlüftung im Raum ohne PCM bei einer Putzschichtdicke von 3 cm

REDUKTION AN ÜBERHEIZUNGSSTUNDEN [%]	Grundlüftung mit einfachem Luftwechsel von 0 h - 24 h	Grundlüftung mit einfachem Luftwechsel von 7 h - 19 h	
		Zweifacher Luftwechsel von 19 h – 7 h mit PCM	Vierfacher Luftwechsel von 19 h – 7 h mit PCM
Grenztemperatur der Überheizungsstunden [°C]	mit PCM		
26	6.1	10.3	5.3
27	9.4	16.5	11.5
28	12.1	19.8	15.1
30	16.1	26.1	25.2

Tab. 8-2: Simulationsergebnis: Prozentuale Reduktion der Überheizungsstunden im Testraum durch Einsatz von PCM gegenüber dem Raum ohne PCM bei gleichem Lüftungsregime bei einer Putzschichtdicke von 3 cm

Während Tab. 8-1 die Reduktionen durch unterschiedliche Maßnahmen (Lüftungsregime bzw. PCM) gegenüberstellt, sind in Tab. 8-2 die Reduktionen genannt, die bei gleichem Lüftungsregime durch PCM erzielt werden. Am effektivsten ist das PCM demnach bei einer Grundlüftung von 1 Vh^{-1} während des Tages, und einem auf 2 Vh^{-1} erhöhten Luftwechsel während der Nachtstunden.

Soweit dies technisch machbar ist, ist eine leicht erhöhte Nachtlüftung zur Effizienzsteigerung des PCM zu empfehlen.

8.3.2 Verschattung

Ein außenliegender Sonnenschutz ist eine der effektivsten Maßnahmen, um die Überhitzung von Räumen im Sommer zu minimieren. Dabei ist das rechtzeitige Betätigen der Sonnenschutzvorrichtung wichtig, um einen erhöhten Wärmeeintrag in den Raum durch direkte Solarstrahlung bereits frühzeitig zu vermeiden. In Räumen ohne effektive Verschattungsmaßnahmen steigt die Raumlufttemperatur insgesamt deutlich höher als in Räumen, in denen rechtzeitig die Strahlungstransmission durch transparente Flächen reduziert wird.

Für die nachfolgend dargestellten Ergebnisse wurde im Simulationsmodell ein außenliegender Sonnenschutz mit einem Abminderungsfaktor von $f = 0.95$ angenommen (Abb. 8-23 - 8-26) und einem komplett unverschatteten Raum gegenüber gestellt (Abb. 8-21 - 8-22). Der Sonnenschutz wird ab einer auf die betrachtete Fläche auftretenden Strahlung von 175 W/m^2 betätigt und verschattet dann die komplette Fensterfläche. (Anm.: In realen Gebäuden liegt das Nutzerverhalten zwischen den beiden hier betrachteten Extrema. Eine komplette Verschattung des Fensters wird wegen des Bedürfnisses nach Tageslicht im Allgemeinen nicht durchgeführt. In Fällen, in denen kein außenliegender Sonnenschutz vorhanden ist, wird normalerweise ein innenliegender Sonnenschutz genutzt, um blendendes Sonnenlicht zu verhindern.)

In unverschatteten Räumen mit direkter Strahlungstransmission werden die PCM-Schichten durch die solare Oberflächenabsorption stärker erwärmt. Dieser Temperaturanstieg führt aufgrund des langwelligigen Strahlungsaustauschs auch bei nicht direkt bestrahlten PCM-konditionierten Flächen zu erhöhtem Wärmeeintrag.

Abb. 8-21 zeigt die sich bei dem simulierten Zellenbüro (Raumtyp L) ohne Verschattung einstellenden Lufttemperaturen mit PCM (rot) und ohne PCM (blau). Für denselben Raum sind in Abb. 8-22 die entsprechenden Oberflächentemperaturen einer nicht direkt bestrahlten Innenwand zu sehen. Die Peak-Temperatur des 3 cm stark aufgetragenen PCM-Putzes entspricht mit $\theta_2 = 28^\circ\text{C}$ dem Phasenübergangsbereich des untersuchten realen Putzes.

Maßgebliche Temperaturreduktionen durch PCM werden dann erzielt, wenn die Raumlufttemperatur auf über 29°C steigt. Die Oberflächentemperaturen des PCM-Putzes können gegenüber dem herkömmlichen Putz an Spitzentagen um bis zu 4 K gesenkt werden. Trotz der Anwendung des PCM-Putzes überschreitet die Raumtemperatur an vier Tagen den Bereich der thermischen Behaglichkeit mit einer maximalen Raumlufttemperatur von $\theta_{\text{RL}} = 28^\circ\text{C}$.

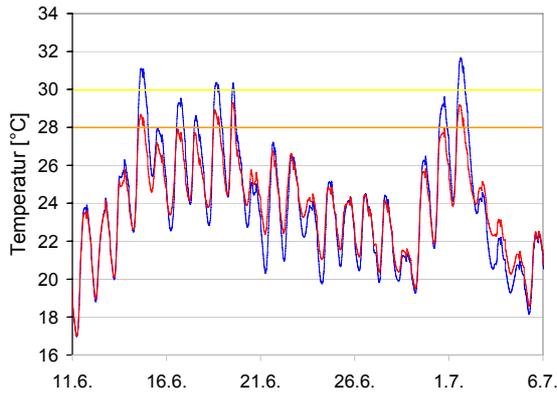


Abb. 8-21: Raumlufttemperaturen ohne Verschattung

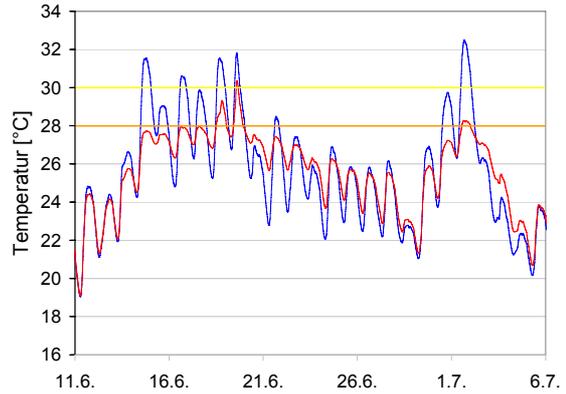


Abb. 8-22: Oberflächentemperaturen ohne Verschattung

Putzschichtdicke 3 cm, Peak-Temperatur des PCM-Putzes $\theta_2 = 28^\circ\text{C}$, Blau: Ohne PCM, Rot: Mit PCM

Bei der Anwendung eines Sonnenschutzes (Abb. 8-23 und 8-24) können auch ohne PCM die Raumtemperaturen unter die Werte gesenkt werden, die sich mit PCM in einem unverschatteten Raum erzielen lassen. Der Effekt des gewählten PCM-Putzes mit $\theta_2 = 28^\circ\text{C}$ ist dann nur noch gering, da insgesamt keine Raumlufttemperaturen über 29°C auftreten. Die maximalen Oberflächentemperaturen liegen bei Verschattung zwischen 26°C und 27°C . Dies bedeutet, dass nur maximal 50 % der Latentwärmespeicherkapazität in den oberflächennahen Schichten genutzt werden kann. Tiefere Schichten werden entsprechend kaum aktiviert.

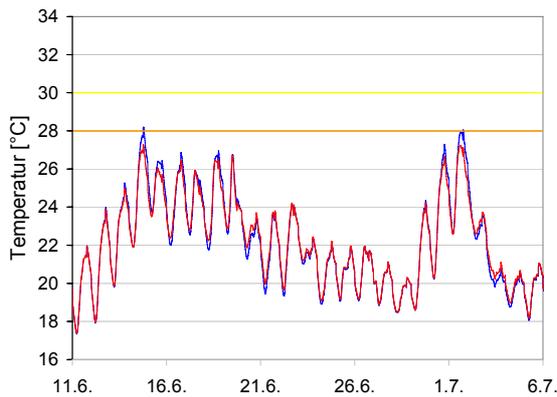


Abb. 8-23: Raumlufttemperaturen mit Verschattung

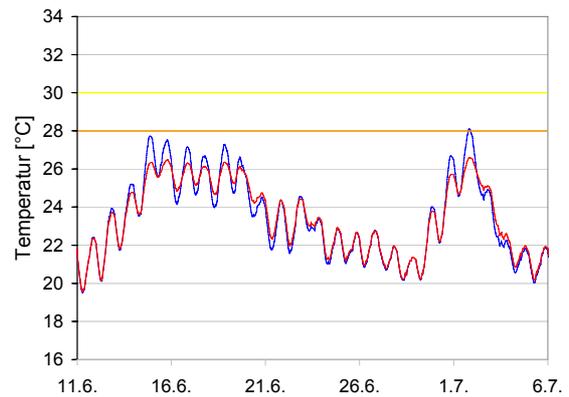


Abb. 8-24: Oberflächentemperaturen mit Verschattung

Putzschichtdicke 3 cm, Peak-Temperatur des PCM-Putzes $\theta_2 = 28^\circ\text{C}$, Blau: Ohne PCM, Rot: Mit PCM

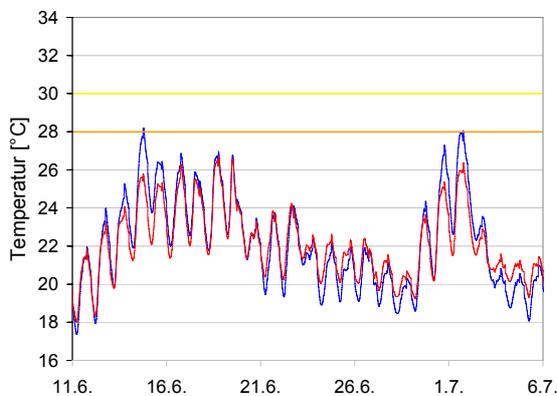


Abb. 8-25: Raumlufttemperaturen mit Verschattung

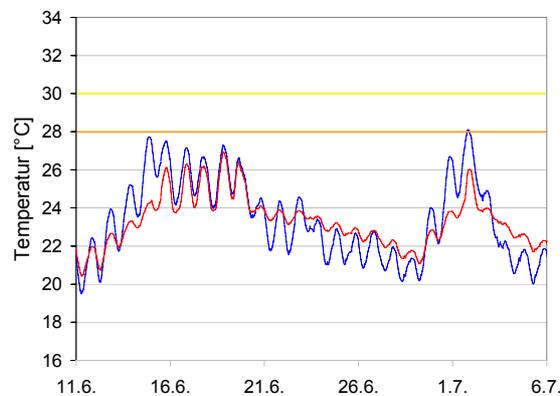


Abb. 8-26: Oberflächentemperaturen mit Verschattung

Putzschichtdicke 3 cm, Peak-Temperatur des PCM-Putzes $\theta_2 = 24^\circ\text{C}$, Blau: Ohne PCM, Rot: Mit PCM

Um die Leistungsfähigkeit des PCM-Putzes trotz der durch Verschattung bereits deutlich geminder- ten Raumtemperaturen stärker zu nutzen, wird die Peak-Temperatur auf $\theta_2 = 24^\circ\text{C}$ gesenkt. In Abb. 8-25 und 8-26 sind die maximalen PCM-Effekte an den Tagen zu sehen, wenn die Raumtemperatur ohne PCM über 27°C steigt. Mit PCM liegen die Raumtemperaturen über den gesamten betrachte- ten Zeitraum unterhalb von 27°C .

Betrachtet man die Raumtemperaturverläufe während des Tages werden diese durch die Verschatt- ung gegenüber der unverschatteten Variante deutlich gedämpft. Die Tagesschwankungen der Raumluft- und der Oberflächentemperatur werden durch den Sonnenschutz reduziert und die Tem- peraturdifferenz zwischen Raumluft und Bauteiloberfläche ist aufgrund der fehlenden solaren Ober- flächenabsorption geringer als beim Auftreffen von direkter Solarstrahlung auf Wandflächen.

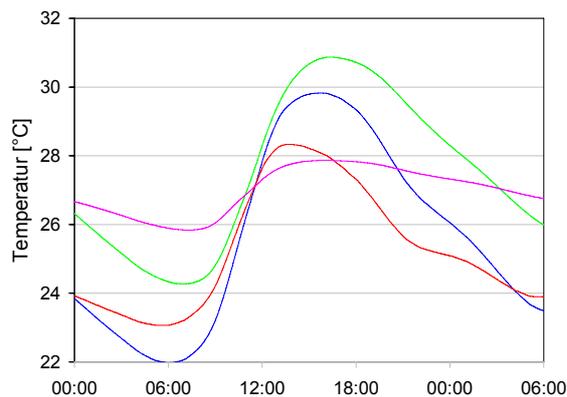


Abb. 8-27: Temperaturen ohne Verschattung

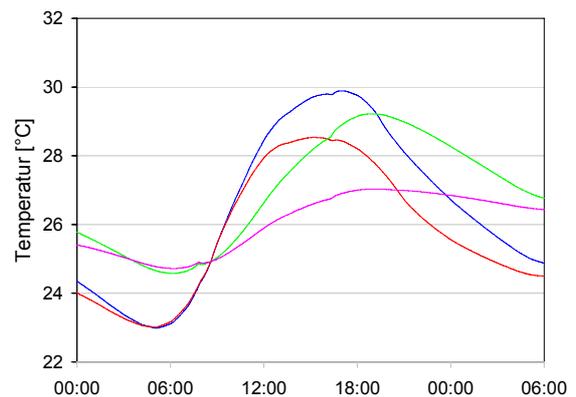


Abb. 8-28: Temperaturen mit Verschattung

Putzschichtdicke 3 cm, Peak-Temperatur des PCM-Putzes $\theta_2 = 24^\circ\text{C}$

Blau: Lufttemperatur ohne PCM; Grün: Oberflächentemperatur ohne PCM

Rot: Lufttemperatur mit PCM; Pink: Oberflächentemperatur mit PCM

Abb. 8-27 und 8-28 zeigen typische Luft- und Oberflächentemperaturverläufe mit und ohne Ver- schattung. Der Betrachtung ohne PCM wird der Temperaturverlauf bei Verwendung eines 3 cm dic- ken PCM-Putzes mit $\theta_2 = 28^\circ\text{C}$ gegenübergestellt. Die Bedeutung dieser verminderten Tempe- raturdifferenz liegt in der Wahl der optimalen Peak-Temperatur, die – bei gleichen Raumtemperatu- ren – im Falle von Verschattung tiefer liegen sollte als bei unverschatteten Räumen.

8.4 Räume und Raumtypen

8.4.1 Zellenbüro

Die in Abb. 8-29 - 8-30 gezeigten Überhitzungsstunden bei einer Grenztemperatur $\theta_{\text{Grenz}} = 26^\circ\text{C}$ wurden für Büroräume Raumtyp L und XL gemäß VDI 2078 berechnet (Anhang 12). Die Räume werden als zentral im Gebäude liegende Zellenbüros angenommen und die Orientierung des Ge- bäudes wurde variiert. Als Klimadatensätze wurden Nr. 1 und Nr. 3-10 aus Anhang 11 verwendet, wobei die extremen Datensätze Nr. 4, 5, 6 und 8, 9, 10 hohe Überhitzungszeiten nach sich zogen. Räume, in denen die Anzahl der Überhitzungsstunden ohne PCM einen Grenzwert von 1000 h (während des gesamten Jahres ohne Ausschluss von Wochenenden) überschritt, wurden aus der Betrachtung ausgeschlossen.

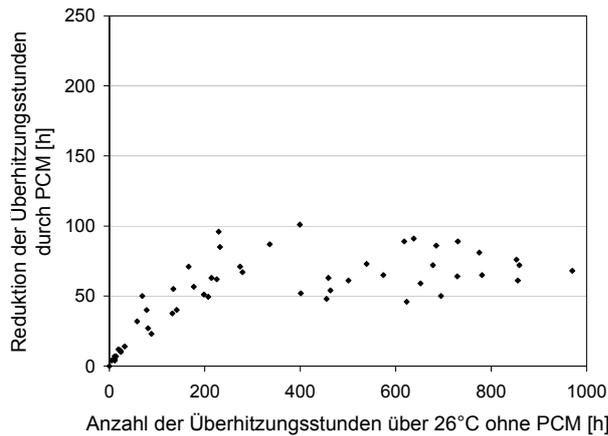


Abb. 8-29: Raumtyp L

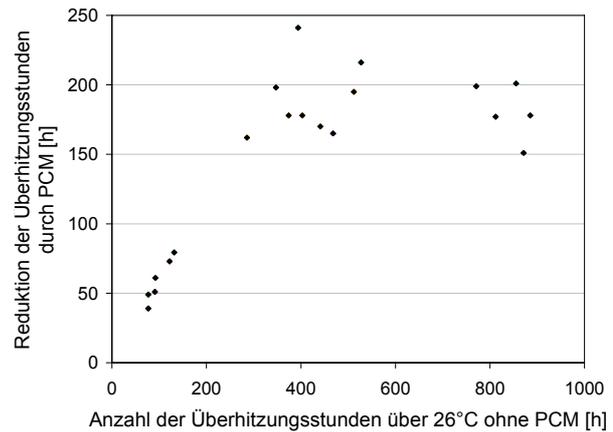


Abb. 8-30: Raumtyp XL

Für den Bereich bis zu 400 Überheizungsstunden ohne PCM kann sowohl für den Raumtyp L wie auch für den Raumtyp XL ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen Überheizungsstunden ohne PCM und der Reduktion durch eine 3 cm dicke PCM-Schicht mit optimierter Phasenübergangstemperatur (θ_2 zwischen 23° und 26°C) festgestellt werden. In dem Bereich über 400 Überheizungsstunden ohne PCM sind die Verhältnisse im Raum so, dass keine weitere Reduktion erzielt werden kann. Dies tritt deshalb ein, weil die nächtlichen Temperaturen nicht unter den Phasenübergangsbereich gekühlt werden können und die Raumtemperatur den Phasenübergangsbereich des PCM deutlich überschreitet.

8.4.2 Orientierung

Obwohl das Problem der sommerlichen Überhitzung in Einzelfällen auch in nord-orientierten Räumen auftreten kann, ist das Einsatzgebiet von PCM vorwiegend in Räumen zu suchen, die während eines klaren Tages direkter Sonnenstrahlung ausgesetzt sind.

Aufgrund des höheren Sonnenstandes ist der Einfallswinkel bei hauptsächlich süd-orientierten vertikalen Flächen im Sommer am größten, weshalb eine reine Süd-Orientierung etwas weniger problematisch ist, als es transparente süd-ost-, süd-west- und west-orientierte Flächen sind. Süd-West und West-Orientierungen sind besonders überhitzungsgefährdet, da der geringe Einfallswinkel am Nachmittag einen hohen Solareintrag bedingt, der zeitlich mit dem Außenlufttemperatur-Maximum zusammen trifft. Die höchste Außentemperatur tritt im Sommer zwischen ca. 14:00 - 15:00 Uhr auf.

Betrachtet man die absolute Reduktion der Überheizungsstunden in Abhängigkeit von den ohne PCM auftretenden Überheizungsstunden, konnte in Kap. 8.4.1 im Bereich < 400 h unter verschiedenen klimatischen Bedingungen ein annähernd linearer Anstieg mit gewissen Streuungen beobachtet werden. Eine Abhängigkeit der Residuen von der jeweiligen Orientierung konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht festgestellt werden. Eine Regression, die für die Orientierungen Ost, Süd-Ost, Süd, Süd-West und West durchgeführt wurde, ergibt die in Tab. 8-3 aufgeführten Koeffizienten der Geradengleichung $y = ax + b$ mit der Restriktion $b = 0$. Dabei entspricht y der durch die Verwendung des 3 cm dicken PCM-Putzes mit optimiertem Phasenübergangsbereich erzielten Reduktion von Überheizungsstunden und x der Anzahl der Überheizungsstunden ohne PCM-Putz.

	Bestimmtheitsmaß R^2	Koeffizient $y = a \cdot x$	Standardfehler	95%iges Konfidenzintervall	
				untere Grenze	obere Grenze
OST	0.84	0.510	0.045	0.404	0.616
SÜD-OST	0.83	0.458	0.040	0.366	0.551
SÜD	0.77	0.359	0.035	0.282	0.436
SÜD-WEST	0.82	0.491	0.051	0.373	0.609
WEST	0.83	0.279	0.017	0.237	0.320
GESAMT	0.75	0.393	0.022	0.350	0.437

Tab. 8-3: *Regression der Reduktion durch einen 3 cm dicken PCM-Putz
Einfluss der Orientierung und Gesamtbetrachtung*

9 Empfehlungen

Verschiedene Kriterien legen die Anwendung eines PCM-Putzes nahe:

- leichte oder sehr leichte Bauweise des Raumes
- hoher Solareintrag (bedingt durch Fensterfläche, Verglasungsart, Orientierung etc.)
- hohe interne Lasten
- Ausschöpfung anderer Maßnahmen ohne ausreichendes Ergebnis

Werden Gebäude bzw. Räume eines Gebäudes aus einem der oben genannten Gründe vom Planer als problematisch im Hinblick auf die sommerliche Temperaturentwicklung erachtet, ist die Anwendung eines PCM-Putzes zu überlegen.

9.1 Empfehlungen für Planer

9.1.1 Erzielbare Temperaturreduktion durch PCM-Putz

Wie in Kap. 8.2 gezeigt, eignet sich die Anwendung von PCM-Putz in Büroräumen, deren Bauweise als leicht bis sehr leicht zu bezeichnen ist. In Räumen mit geringer thermischer Masse kann der PCM-Putz an heißen Tagen die auftretenden Raumlufttemperaturen deutlich verringern. Die zu erwartende maximale Reduktion der Raumlufttemperaturen ist in Tab. 9-1 dargestellt:

d	r	r*	r _{OF}
Schichtdicke des PCM-Putzes	Raumlufttemperaturreduktion durch PCM-Putz verglichen mit 1 cm eines herkömmlichen Vergleichsputz ohne PCM	Raumlufttemperaturreduktion durch PCM-Putz verglichen mit herkömmlichem Vergleichsputz entsprechender Schichtdicke	Oberflächentemperaturreduktion durch PCM-Putz verglichen mit herkömmlichem Vergleichsputz entsprechender Schichtdicke
[cm]	[K]	[K]	[K]
1	1.0 - 2.5	1.0 - 2.5	2.0 - 3.5
2	2.5 - 3.0	1.5 - 2.5	2.5 - 4.0
3	3.0 - 3.5	2.0 - 3.0	3.0 - 5.0
5	4.0 - 5.0	2.5 - 3.0	3.5 - 5.0

Tab. 9-1: Reduktion der Maximaltemperaturen bei Anwendung von PCM-Putz unterschiedlicher Schichtdicken

Die maximale Reduktion wird unter der Voraussetzung erreicht, dass das PCM nachts entladen wird, und die Raumlufttemperatur ohne PCM in etwa um r^* über der Peak-Temperatur θ_2 liegt. Für den untersuchten Putz bedeutet das, dass die maximale Reduktion bei Raumlufttemperaturen ohne PCM von 29°C - 31°C erreicht wird.

Wie häufig die Reduktion der Raumlufttemperaturen erreicht werden kann, hängt also von den thermischen Verhältnissen im Raum ab. Für die in der DIN 4108-2 angegebenen Grenztemperaturen 25°C, 26°C und 27°C liegt die Phasenübergangstemperatur des untersuchten Putzes zu hoch.

Die Simulationsergebnisse aus Kap. 8 zeigen, dass bei optimierter Phasenübergangstemperatur unter geeigneten Bedingungen eine Reduktion von max. ~ 250 Überhitzungsstunden im Jahr möglich ist. Die Anwendung eines PCM-Putzes kann dann dazu beitragen, dass die Anforderungen der DIN 4108-2 (s. Kap. 1.3) erfüllt werden können. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass die Überschreitung der betrachteten Grenztemperatur ohne Einsatz von PCM nicht mehr als ~ 400 Überhitzungsstunden beträgt.

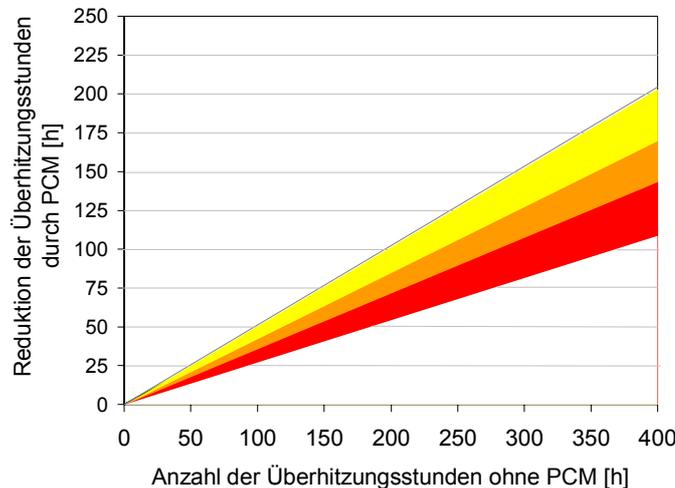


Abb. 9-1: Reduktion der Überhitzungsstunden bei Grenztemperaturen gemäß DIN 4108-2, Idealer PCM-Putz mit optimierter Peak-Temperatur θ_2 , Putzschichtdicke $d = 3 \text{ cm}$
 Roter Bereich: $\theta_{\text{Grenz}} = 25^\circ\text{C}$, Oranger Bereich: $\theta_{\text{Grenz}} = 26^\circ\text{C}$, Gelber Bereich: $\theta_{\text{Grenz}} = 27^\circ\text{C}$

Abb. 9-1 gibt Hinweise, mit welcher Reduktion durch einen optimierten PCM-Putz zu rechnen ist. Dabei wurde eine Auftragsstärke von 3 cm angenommen. Die Reduktion bezieht sich auf den Vergleich mit einem Raum, der mit einem herkömmlichen Putz derselben Auftragsstärke ausgestattet ist.

Die in verschiedenen Farben dargestellten Bereiche bezeichnen unterschiedliche Grenztemperaturen. Werden die Überhitzungsstunden über 25°C (roter Bereich) gezählt, ist die erzielbare Reduktion geringer als bei einer Grenztemperatur von 26°C (oranger Bereich) oder 27°C (gelber Bereich). Die Bereiche stellen das 95 %ige Konfidenzintervall dar, das sich bei der statistischen Auswertung der Simulationsergebnisse unterschiedlicher Gebäudetypen, Orientierungen und Klimabedingungen ergibt. (Geringfügige Überlappungen der Grenzen des mittleren Bereichs mit den angrenzenden Bereichen wurden gemittelt.) Es wurden zur Untersuchung nur Modelle herangezogen, die ohne $\text{PCM} \leq 400$ Überhitzungsstunden aufweisen.

Die Peak-Temperatur des Phasenübergangs, die dem verwendeten PCM-Putz in der Simulation zugrunde liegt, wurde von 23°C bis 26°C variiert und dem jeweiligen Simulationsmodell, entsprechend der betrachteten Grenztemperatur, optimal angepasst. Im Bereich der Grenztemperatur 25°C lagen die optimalen Peak-Temperaturen bei 23°C , entsprechend bei $23 - 24^\circ\text{C}$ für eine Grenztemperatur von 26°C und bei $24 - 25^\circ\text{C}$ für eine Grenztemperatur von 27°C .

Weicht die Peak-Temperatur um 2 - 3 K von den genannten Werten ab, muss mit einer Verringerung der Reduktion der PCM-Effekte um bis zu 25 % gerechnet werden. Eine leichte Unterschreitung der empfohlenen Peak-Temperaturen ist dabei weniger problematisch als zu hohe Phasenübergänge,

solange die Entladung gewährleistet ist. Die geringere Reduktion für eine Grenztemperatur der Überhitzungsstunden von 25°C lässt sich entsprechend mit der schwierigeren nächtlichen Entladung des PCM bei einer Peak-Temperatur von $\theta_2 = 23^\circ\text{C}$ erklären.

Der untersuchte reale (und inzwischen kommerziell verfügbare [76]) PCM-Putz mit einer Peak-Temperatur $\theta_2 = 28^\circ\text{C}$ erzielt die größten Effekte, wenn ohne PCM Raumtemperaturen $> 30^\circ\text{C}$ auftreten. Er ist zum Einsatz in Räumen zu empfehlen, in denen die möglichen sommerlichen Wärmeschutzmaßnahmen ausgeschöpft sind und relativ hohe Raumtemperaturen auftreten. Dort können die Temperaturspitzen geglättet werden und Überhitzungszeiten reduziert werden. Die erzielbare Reduktion an Überhitzungsstunden aus Abb. 9-1 muss um 25% abgemindert werden, so dass für eine 3 cm dicke Schicht des untersuchten Putzes mit folgender, in Abb. 9-2 dargestellten, Reduktion an Überhitzungsstunden gerechnet werden kann:

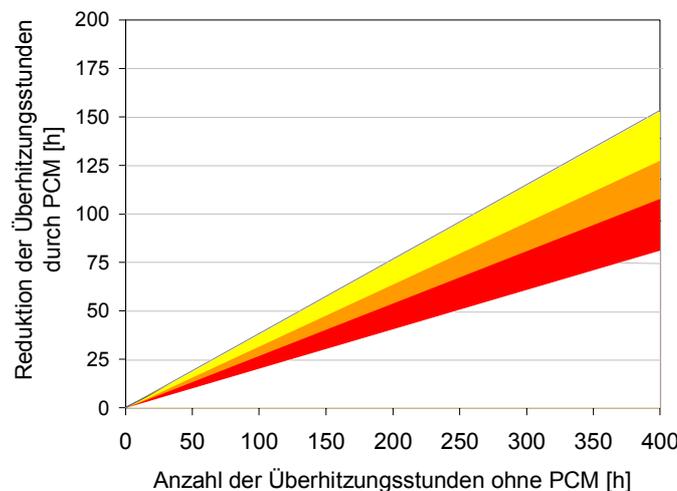


Abb. 9-2: Reduktion der Überhitzungsstunden bei Grenztemperaturen gemäß DIN 4108-2, Realer PCM-Putz mit Peak-Temperatur $\theta_2 = 28^\circ\text{C}$, Putzschichtdicke $d = 3\text{ cm}$
 Roter Bereich: $\theta_{Grenz} = 25^\circ\text{C}$, Oranger Bereich: $\theta_{Grenz} = 26^\circ\text{C}$, Gelber Bereich: $\theta_{Grenz} = 27^\circ\text{C}$

9.1.2 Nutzbare Schichtdicke

Bereits eine 1 cm dicke Schicht des untersuchten PCM-Putzes führt zu einer relevanten Abminderung der Spitzentemperatur an einzelnen heißen Tagen. Überhitzungsstunden können jedoch effektiver mit größeren Schichtdicken reduziert werden. Zur Anwendung wird auf Basis der vorliegenden Simulationsergebnisse eine PCM-Putzschichtdicke von 2 - 3 cm empfohlen bei einer Wärmeleitfähigkeit $\lambda \leq 0.25\text{ W/mK}$.

Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit des PCM-Putzes ist die nutzbare Schichtdicke unter normalen Raumtemperaturverläufen begrenzt auf ca. 4 cm. Die effektive Verbesserung bei einer Erhöhung von 3 auf 4 cm ist nur noch gering. Bei noch dickeren Schichten sind die relativen Effekte im Hinblick auf die Reduktion sowohl der Maximaltemperaturen wie auch der Überhitzungsstunden noch geringer.

Zu dicke PCM-Schichten können sich auch negativ auswirken und den Raum durch den Wärmespeichereffekt längere Zeit auf einem höheren Temperaturniveau halten. Je dicker die PCM-Putzschicht ist, umso schwieriger ist die Entladung des PCM während der Nachtstunden. Höhere

Putzschichtdicken sind nur zu empfehlen, wenn die Wärmeleitfähigkeit des PCM-Putzes erhöht werden kann.

Nicht zuletzt empfehlen sich große PCM-Schichtdicken $d > 3$ cm auch aus Gründen der Wirtschaftlichkeit nicht, solange der PCM-Putz ein Vielfaches des herkömmlichen Putzes kostet. In Fällen, in denen die Ergebnisse mit einer 3 cm PCM-Putzschicht nicht zufriedenstellend sind, ist die Verwendung massiver Innenwände, die als sensibler Wärmespeicher dienen, einer weiteren Erhöhung der PCM-Putzschichtdicke vorzuziehen.

9.2 Empfehlungen zur Optimierung von PCM

9.2.1 Einstellung der Phasenübergangstemperatur

Die Simulationsergebnisse aus Kap. 8 zeigen, dass der Phasenübergangsbereich des untersuchten Putzes ($l = 16.5$ kJ/kg) zu hoch liegt. Für dünne Schichten kann der Phasenübergangsbereich dabei etwas höher liegen als für dickere Putzschichten. Basierend auf den Ergebnissen aus Kap. 8.2.1 kann für die betrachteten Büroräume in Leichtbauweise folgende Faustregel aufgestellt werden:

$$\theta_{2,SOLL} = \theta^*_{Grenz} - r^* \quad [9-1]$$

Dabei ist $\theta_{2,SOLL}$ die gesuchte Peak-Temperatur des Phasenübergangsbereichs, θ^*_{Grenz} ist die angestrebte Grenztemperatur und r^* ist die zu erwartende Temperaturreduktion aus Tab. 9-1.

Bei der angestrebten Grenztemperatur sollte gelten, dass diese an nicht mehr als 300 h (für $d = 1$ cm), 350 h ($d = 2$ cm) bzw. 400 h ($d = 3$ cm) im Jahr überschritten werden sollte. (Putzschichtdicken > 3 cm sind bei ansonsten unveränderten Materialeigenschaften des PCM-Putzes nicht zu empfehlen.) Die zu erwartende Zahl der Überhitzungsstunden kann mit Hilfe einer Gebäudesimulation abgeschätzt werden. (Kann die Einhaltung dieses Kriteriums nicht gewährleistet werden, müssen zusätzliche Maßnahmen wie z.B. kleinere Fensterflächen oder außen- statt innenliegender Sonnenschutz in Erwägung gezogen werden.)

Der Temperaturbereich des Phasenübergangs sollte so gewählt werden, dass unter den vorherrschenden Bedingungen der Schmelzvorgang möglichst vollständig stattfindet. Dabei soll die Temperatur im PCM nicht deutlich über den Schmelzpunkt steigen. Um den Phasenübergangsbereich für einen betrachteten Raum zu optimieren, muss daher ein typischer sommerlicher Temperaturgang mit minimalen Nachttemperaturen und maximalen Tagestemperaturen bekannt sein. Dieser möglichst repräsentative Tag dient als Auslegungstemperaturverlauf.

Der Auslegungstemperaturgang sollte keinen Extrehtag repräsentieren, sondern den häufigsten Fall von Überhitzung repräsentieren. Dazu werden Überhitzungsstunden in Klassen eingeteilt und die am häufigsten auftretende Klasse wird als Auslegungsmaximaltemperatur θ^*_{Grenz} gewählt. Die zu erwartende Nachttemperatur bestimmt, ob entsprechend der sich aus Gl. 9-1 ergebenden Bandbreite tendenziell eine höhere oder eine niedrige Peak-Temperatur gewählt werden soll. Dabei gilt als Faustregel, dass während des Auslegungstages die Raumlufftemperatur in der Nacht für mindestens vier Stunden um 3 K unterhalb der Peak-Temperatur liegen muss.

9.2.2 Einstellung der Wärmeleitfähigkeit

Für den betrachteten Putz mit der spezifischen Schmelzwärme von $l = 16.5 \text{ kJ/kg}$ ist eine höhere Wärmeleitfähigkeit nur dann von Interesse, wenn Schichtdicken $d > 3 \text{ cm}$ aufgebracht werden. Dann allerdings ist die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit essentiell, um die tieferen Schichten nutzen zu können. Eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des PCM-Putzes erscheint aufwändig, könnte aber evt. durch besser wärmeleitende Zuschläge im Gips-Putz erzielt werden.

Die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit ist auch dann sinnvoll, wenn PCM mit höherer Latentwärme eingesetzt werden. Dann können dünnere Schichten besser genutzt werden, wenn die Wärmeleitfähigkeit deutlich über dem momentanen Wert liegt.

10 Schlussbetrachtung

10.1 Zusammenfassung

Der Einsatz von Phasenübergangsmaterialien zum sommerlichen Wärmeschutz wird seit Anfang der 90er Jahre erforscht. Mit der Entwicklung einer Mikroverkapselungstechnik für Paraffin wurde die Einmischung von PCM in anorganische Bindemittel möglich. Ziel dieser Arbeit war es, den Einsatz eines PCM-Innenputzes mit mikroverkapseltem Paraffin bezüglich des Potentials zur Reduktion hoher sommerlicher Raumtemperaturen zu untersuchen.

Neben einem realen, industriell gefertigten Prototyp eines PCM-Putzes wurden die Auswirkungen einer modifizierten Putzvariante geprüft. Eine Optimierung des Materials konnte im Hinblick auf seine Wärmeleitfähigkeit und die ideale Phasenübergangstemperatur durchgeführt werden.

Um den realen Putz zu modellieren, wurden Messungen zur Bestimmung seiner exakten thermischen Eigenschaften durchgeführt. Die Methode der Differential-Scanning-Calorimetry wurde angewandt, um die Wärmekapazität im festen und im flüssigen Zustand und die spezifische Latentwärme des Materials zu bestimmen. Die Messungen zeigten, dass das mikroverkapselte Paraffin einen kontinuierlichen Phasenübergang in einem Temperaturbereich $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$ aufweist. Dieser Temperaturbereich umfasst ca. 10 K zwischen 18°C und 28°C, wobei 90 % der Latentwärme zwischen 25°C und 28°C umgesetzt werden.

Die Modellierung des physikalischen Phasenübergangs in einem numerischen Modell erfolgte über eine temperaturabhängige Wärmekapazität. Die DSC-Messungen dienten als Grundlage zur approximativen Bestimmung dieser Funktion $c(\theta)$.

Das entwickelte numerische Modell basiert auf einer Finite-Differenzen-Methode zur Lösung der Fourier'schen Wärmeleitungsgleichung. Der bekannte Lösungsansatz wird um die Berücksichtigung einer während des Phasenübergangs als temperaturabhängig zu betrachtenden Wärmeleitfähigkeit erweitert.

Die Beschreibung des Phasenübergangs kann für den betrachteten PCM-Putz als symmetrisch angenommen werden. D.h. der Schmelzvorgang kann mit derselben Funktion $c(\theta)$ beschrieben werden wie der Erstarrungsvorgang. Bei anderen Phasenübergangsmaterialien (z.B. bei vielen Salzhydraten) ist diese Annahme nicht zulässig. Für diese Fälle wurde eine numerische Beschreibung des unterkühlten Erstarrens mittels einer Funktion $c_{\text{sub}}(\theta)$ entwickelt.

Basierend auf der o. g. Beschreibung des Phasenübergangs wurden Temperaturprofile in PCM-Bauteilen unter periodischen Randbedingungen berechnet. Zur Beurteilung der PCM-Effizienz wurden die Beurteilungskriterien OF-TAV, Q_{eff} und Eindringtiefe eingeführt. Mit Hilfe dieser Kriterien ließen sich Aussagen über den Nutzen einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit und die optimale Phasenübergangstemperatur treffen. Verschiedene Werte für die spezifische Latentwärme des Materials und unterschiedliche Darstellungen des Phasenübergangs wurden gewählt. Jeder betrachtete Parameter wurde für PCM-Schichten bis 10 cm berechnet, wobei die Bauteildicke in 1 cm Schritten erhöht wurde. Aus der Bandbreite der möglichen Parametervariationen wurden typische Varianten ausgewählt und im Hinblick auf die wichtigsten Parameter optimiert.

Folgende Aussagen zur gewünschten Raumklimaverbesserung ergeben sich aus der Analyse der Temperaturprofile:

Als ideal kann ein Phasenübergangsmaterial dann bezeichnet werden, wenn die oberflächennahen Schichten den Temperaturbereich des Phasenübergangs beim Aufschmelzen komplett durchlaufen, während die tieferen Schichten etwas unterhalb der Peak-Temperatur θ_2 bleiben. Aufgrund der Wärmeleitungsbeziehung zwischen oberflächennahen und tieferen Schichten wird so ein sprunghaftes Ansteigen der Oberflächentemperatur vermieden. Optimal ist es, wenn die Temperatur an der Stelle $x = d$ des PCM-Bauteils erst dann die Peak-Temperatur erreicht, wenn die Raumlufttemperatur bereits wieder sinkt.

Ein rapider Temperaturanstieg an der Oberfläche des PCM-Bauteils aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen betrachtetem Bauteil und Raumluft erfolgt dann, wenn das PCM-Bauteil komplett aufgeschmolzen ist. Im flüssigen Zustand ist die Temperaturleitfähigkeit des PCM deutlich höher als während des Phasenübergangs.

Die maximal mögliche Reduktion der Oberflächentemperatur wird maßgeblich durch die spezifische Latentwärme des PCM-Bauteils bestimmt. Im Vergleich dazu führt eine Erhöhung der Schichtdicke eines gegebenen PCM in deutlich geringerem Maße zu einer Oberflächentemperaturreduktion als eine höhere spezifische Latentwärme.

Die maximale Reduktion der Oberflächentemperatur wird für den untersuchten PCM-Putz mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0.21 \text{ W/mK}$ bei einer Schichtdicke von 2 - 3 cm erreicht. Eine Erhöhung der Schichtdicke darüber hinaus bringt keine weitere signifikante Reduktion der Oberflächentemperatur.

In Einzelfällen können zu große Schichtdicken des PCM zu negativen Effekten (= höheren Oberflächentemperaturen) führen, da während der Nachtzeit keine vollständige Erstarrung des geschmolzenen PCM stattfindet. Dies ist insbesondere der Fall bei hohen Werten für die spezifische Latentwärme.

Eine Schichtdicke $> 3 \text{ cm}$ ist dann anzustreben, wenn gleichzeitig die Wärmeleitfähigkeit des Materials erhöht werden kann. Bei besserer Wärmeleitfähigkeit können auch tiefere PCM-Schichten aktiviert werden. Bei dünnen PCM-Schichten wiederum ist eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit nicht zu empfehlen, da in diesem Fall der Phasenübergangsbereich zu schnell durchlaufen wird und der beschriebene Effekt eines rapiden Temperaturanstiegs eintritt.

Die Wahl der optimalen Peak-Temperatur θ_2 hängt von den auftretenden Raumlufttemperaturen ab. Im Fall periodischer Randbedingungen sollte der Phasenübergangsbereich oberhalb der Mitteltemperatur liegen, da anderenfalls die Latentwärmespeicherung dazu führt, dass der Raum auf einem höheren Temperaturniveau gehalten wird.

Je höher die spezifische Latentwärme eines Bauteils ist, umso niedriger sollte der Schmelzpunkt liegen, um die Wärmespeicherkapazität des PCM möglichst vollständig auszuschöpfen. Je dünner die PCM-Schicht ist, umso höher sollte die Peak-Temperatur gewählt werden, um den durch die Temperaturdifferenz Luft - Bauteiloberfläche bedingten Temperaturanstieg nach dem kompletten Aufschmelzen des PCM zu vermeiden.

Während die Eindringtiefe der Temperaturwelle an der Oberfläche eines Bauteils bei konventionellen Materialien nur von den Materialeigenschaften und der Periodendauer abhängt, ist bei Phasenübergangsmaterialien eine Abhängigkeit von der Raumlufttemperaturamplitude gegeben.

Die Eindringtiefe gibt die Bauteiltiefe an, bei der eine relative Reduktion von $1/e$ der Oberflächenamplitude erzielt wird. Dabei ist die Eindringtiefe umso geringer, je stärker die Raumlufttemperatur schwankt. Die tatsächlich nutzbare Schichtdicke ist jedoch umso höher, je höher der Wärmeeintrag in das PCM-Bauteil ist, der sich über den Wärmeübergangskoeffizienten und die Temperaturdifferenz zwischen Raumluft und Oberfläche bestimmt.

Diese Aussagen basieren auf Ergebnissen, die unter der Annahme einer gegebenen Raumtemperatur berechnet wurden und beinhalten nicht die Wechselwirkung zwischen Latentwärmespeichervorgang und sich einstellender Raumtemperatur. Dies schränkt die Übertragbarkeit auf reale Räume etwas ein. Die qualitativen Aussagen sind dennoch gültig, da die Reduktion der Oberflächentemperatur einen entscheidenden Einfluss auf die Verbesserung der thermischen Behaglichkeit in einem Raum hat.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein PCM-Modul entwickelt und in das Gebäudesimulationsprogramm ESP-r implementiert. Damit lässt sich der Einfluss eines PCM-Putzes auf das gesamte Raumklima gegenüber einem identischen Raum ohne PCM untersuchen. Das PCM-Modul basiert auf der Beschreibung des Phasenübergangs als latente Wärmekapazität. Als Besonderheit können vom Nutzer des Programms zwei Approximationstypen für $c(\theta)$ benutzt werden. Eine exponentielle Darstellung, für die die Kenntnis der spezifischen Schmelzwärme und der Peak-Temperatur θ_2 ausreicht, ermöglicht die Untersuchung diverser PCM. Eine gebrochen-rationale Approximation erlaubt alternativ die Simulation von Phasenübergängen, deren qualitativer Verlauf signifikant von einer Exponentialfunktion abweicht.

Mit dem neu entwickelten PCM-Modul wurde das Raumklima unter verschiedenen klimatischen Randbedingungen berechnet. Es wurde jeweils ein Vergleichsraum mit herkömmlichem Putz simuliert, dessen Ergebnisse mit denen des Raumes mit PCM-Putz verglichen wurden. Für den PCM konditionierten Raum wurden nicht nur die thermischen Konstanten des realen Putzes verwendet, sondern die Parameter Peak-Temperatur und Wärmeleitfähigkeit wurden variiert und für den betrachteten Fall in Abhängigkeit von der Schichtdicke optimiert. Der Einfluss des Lüftungsverhaltens und die Auswirkungen einer Abminderung des Solareintrags durch Verschattung auf das PCM wurden untersucht. Die Simulationen wurden für verschiedene Raumtypen durchgeführt, wobei aus dem Parameterfenster, das sich durch die Vielzahl der Einflussgrößen aufspannt, möglichst relevante Varianten gewählt wurden.

Auf Basis der Simulationsergebnisse lassen sich folgende Aussagen treffen:

Die Betrachtung der Überhitzungsstunden für unterschiedliche Grenztemperaturen bei Variation der Peak-Temperaturen ergibt optimale Phasenübergangstemperaturen in Abhängigkeit von den angestrebten Maximaltemperaturen. Für diese Grenztemperaturen, die in der DIN 4108-2 entsprechend der Klimaregion auf 25°C , 26°C und 27°C festgelegt werden, ist die Peak-Temperatur $\theta_2 = 28^\circ\text{C}$ des untersuchten PCM-Putzes zu hoch.

Optimale Peak-Temperaturen, die in einem Raum Überhitzungszeiten mit Grenztemperaturen von 25°C bis 27°C minimieren, liegen zwischen 23°C und 26°C . Bei zu hohen Peak-Temperaturen kann die Latentwärmespeicherkapazität des Materials nicht vollständig genutzt werden. Bei zu niedrigen Phasenübergängen ist die Erstarrung des Materials während der Nachtzeit problematisch.

Der Phasenübergangsbereich des experimentell untersuchten PCM-Putzes ist ideal, um Überhitzungsstunden über 30°C bis 32°C zu vermeiden. Die Einstellung der Phasenübergangstemperatur des mikroverkapselten Paraffins sollte in Abhängigkeit von den zu erwartenden Raumtemperaturen durchgeführt werden. Hierzu ist die Bestimmung eines Auslegungstages sinnvoll.

Die geeignete Wahl der Phasenübergangstemperatur ist zudem von der Putzschichtdicke abhängig. Die ideale Peak-Temperatur liegt bei einer 1 cm dicken Putzschicht 1 - 2 K unter der anvisierten Grenztemperatur, bei einer 3 cm dicken Putzschicht 2 - 3 K darunter.

Da sich die operative Raumtemperatur aus Lufttemperatur und Oberflächentemperatur zusammensetzt, muss die Kopplung zwischen PCM-Temperatur und Lufttemperatur zur Bestimmung des idealen Temperaturbereichs des Phasenübergangs beachtet werden. Es hat sich gezeigt, dass bei stark verminderter solarer Oberflächenabsorption durch Verschattung von der empfohlenen Peak-Temperatur weiterhin 1 K abgezogen werden sollte.

Empfehlenswerte PCM-Putzschichtdicken liegen bei 1 - 3 cm. Eine Erhöhung der Schichtdicke auf $d > 3$ cm bringt nur noch geringe Verbesserungen. Um größere Putzschichtdicken sinnvoll zu nutzen, muss die Wärmeleitfähigkeit des PCM-Putzes erhöht werden.

Werden höhere Werte für die spezifische Latentwärme des Materials angesetzt, reduziert sich die nutzbare Schichtdicke weiter. Daher ist die großflächige Verwendung des PCM-Putzes mit der gegebenen spezifischen Latentwärme von $l = 16.5$ kJ/kg an Wänden und Decken zu empfehlen. Sie ist einer kleinflächigen Anbringung von PCM-Elementen mit höherer Latentwärme vorzuziehen.

Kann das PCM während der Nachtstunden nicht erstarren, erschöpft sich seine Fähigkeit zur Latentwärmespeicherung. Erhöhte Nachtlüftung führt bei entsprechend niedrigen Außentemperaturen zu höherem Wärmeübergang und kann damit zur besseren Entladung des PCM beitragen. Ein sinnvolles Lüftungsregime ist grundsätzlich Voraussetzung für einen erfolgreichen sommerlichen Wärmeschutz. Da die Effizienz einer erhöhten Nachtlüftung mit der im Raum vorhandenen thermischen Masse zunimmt, sollte in Leichtbauten der Anwendung eines PCM-Putzes der Vorzug gegenüber einer reinen Erhöhung des Luftwechsels gegeben werden.

Grundsätzlich erweist sich der Einsatz von PCM als besonders geeignet in Räumen mit geringer thermischer Masse. Ausgehend von den Musterbüros der VDI 2078 ist eine Konditionierung mit PCM-Putz bei Raumtyp L und XL empfehlenswert. In mittelschweren Büroräumen (Raumtyp M) und schweren Büroräumen (Raumtyp S) ist eine geringere Temperaturreduktion festzustellen, da die massiven Innenbauteile bereits eine bedeutende Wärmespeicherfähigkeit aufweisen.

Die Simulationsergebnisse zeigen auch, dass bei einer Grenztemperatur-Überschreitung der Raumluft ohne PCM an mehr als 400 h im Jahr die Anwendung eines PCM-Putzes nicht mehr ausreicht, um annehmbare thermische Verhältnisse zu schaffen. Dies kann in Leichtbauten dann auftreten, wenn die klimatischen Randbedingungen höhere Außentemperaturen beinhalten. In diesen Fällen müssen zusätzliche Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz durchgeführt werden.

Zur experimentellen Untersuchung der Auswirkungen des PCM-Putzes und zur Validierung des Simulationstools wurden zwei Testräume im Verifikationsobjekt des Sonderforschungsbereiches SFB 524 der Bauhaus-Universität Weimar aufgebaut. Von den in Leichtbauweise errichteten Räumen mit großem Fensterflächenanteil wurde ein Raum mit herkömmlichem Gips-Innenputz und der

zweite Raum mit PCM-Putz verputzt. Bei der ersten Versuchserie wurde der Putz 1 cm stark aufgetragen; für die zweite Versuchsreihe wurden weitere 2 cm aufgeputzt. Thermoelemente zur Messung der Lufttemperatur und der Temperaturen im Putz und an der Oberfläche wurden in beiden Räumen angebracht. Die Außenlufttemperatur und die Solarstrahlung wurden am Verifikationsobjekt gemessen.

Eine deutliche Temperaturreduktion in dem PCM-konditionierten Raum gegenüber dem Referenzraum ohne PCM war an heißen Tagen messbar. Für die erste Messreihe mit 1 cm Putzschichtdicke konnten maximale Lufttemperaturreduktionen von 1.5 - 3.0 K und maximale Oberflächentemperaturreduktionen von 3.5 K gemessen werden. In der zweiten Messreihe ergaben sich mit 3 cm Putzschichtdicke gemessene Lufttemperaturreduktionen von 2.5 - 4.5 K und maximale Oberflächentemperaturreduktionen von 5.0 K. Diese maximalen Werte wurden an Tagen gemessen, an denen die Raumtemperaturverhältnisse für die Wirkung des verwendeten PCM-Putzes ideal waren.

Ein Validierungsklimadatensatz, der ein komplettes Jahr umfasst und vier signifikante Messperioden beinhaltet, wurde erstellt und in das Gebäudesimulationsprogramm eingelesen. Die Messperioden enthalten Messungen mit zwei verschiedenen PCM-Putzschichtdicken (1 cm und 3 cm) und unterschiedlichen Lüftungsregimen (Infiltrationsluftwechsel und Nachtlüftung). Mit dem in ESP-r realisierten Modell, das das Verifikationsobjekt repräsentiert, wurden Simulationsläufe durchgeführt und die jeweiligen Raumtemperaturen berechnet. Die Übereinstimmung zwischen den Simulations- und den Messergebnissen ist sehr gut.

10.2 Fazit

Die Anwendung eines für das Bauwesen geeigneten PCM-Putzes ist in Büroräumen mit geringer thermischer Masse sinnvoll. Hierzu zählen typische Zellenbüros, die in Leichtbauweise errichtet sind. Die operative Temperatur kann in solchen Räumen bei großflächigem Aufbringen eines PCM-Putzes um bis zu 4 K abgemindert werden. Um diese Reduktion zu erreichen sollten die Innenwände und die Decke des Raumes mit PCM-Putz konditioniert werden.

PCM-Putze sind insbesondere für solche Räume zu empfehlen, deren tägliche Maximaltemperaturen unter den betrachteten sommerlichen Bedingungen nicht allzu großen Schwankungen unterliegen. Für solche Räume kann ein Auslegungstag bestimmt werden, der den typischen sommerlichen Temperaturgang kennzeichnet. Voraussetzung für den effektiven Einsatz des PCM-Putzes ist dann, dass der Temperaturbereich des Phasenübergangs ideal auf den Auslegungstag eingestellt wird.

Die Minimierung der Überhitzungsstunden durch außenliegende Verschattung und mit Hilfe eines adäquaten Lüftungsregimes sollte vor der Anwendung eines PCM-Putzes in Betracht gezogen werden. Mit den genannten Maßnahmen ist es möglich, einzelne Spitzentemperaturen zu vermeiden, womit der geforderte Auslegungstag leichter bestimmt werden kann.

Die Anwendung eines PCM-Putzes an Innenwänden und Decke kann in Büroräumen dazu beitragen, die Anforderungen der DIN 4108-2 in Bezug auf die maximalen Überhitzungszeiten einzuhalten. Voraussetzung dafür ist, neben einer optimierten Phasenübergangstemperatur, dass das 10 %-Kriterium auf die jährliche Nutzungszeit bezogen wird. An einzelnen Tagen können trotz PCM-Putz Raumlufttemperaturen auftreten, die die Grenztemperaturen der DIN 4108-2 für mehr als eine Stunde überschreiten.

PCM-Putz ist daher nicht geeignet, die Einhaltung von maximalen Raumlufttemperaturen zu garantieren. Bei optimierter Phasenübergangstemperatur kann mit einer PCM-Konditionierung die thermische Behaglichkeit jedoch deutlich verbessert werden. Eine Reduktion sommerlicher Überhitzung um bis zu 250 h im Jahr ist möglich.

10.3 Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Effektivität eines PCM-Putzes als rein passive Maßnahme zur Reduktion sommerlicher Überhitzung betrachtet. Als Ergebnis vielfältiger Mess- und Simulationsergebnisse kann eine bedeutende Reduktion an Überhitzungsstunden festgestellt werden. Gleichzeitig führt der begrenzte Temperaturbereich des Phasenübergangs dazu, dass an einzelnen Tagen eine Überhitzung des Raumes nicht vermieden werden kann.

Der aktuelle Trend in Normung und Rechtssprechung geht in Richtung der Festlegung von Maximalwerten, die eingehalten werden müssen. Die Ansprüche an den thermischen Komfort in Gebäuden werden immer höher und die Bereitschaft, zugesicherte Eigenschaften per Gerichtsbeschluss einzuklagen steigt. Dies kann in vielen Fällen dazu führen, dass eine Raumluftkonditionierung zur Einhaltung bestimmter Grenzwerte favorisiert wird.

Aus ökologischen Gründen ist der vermehrte Einsatz von Klimaanlage wegen des hohen Primärenergieverbrauchs abzulehnen. Insbesondere im Rahmen der CO₂ - Reduktion zum Klimaschutz sollte passiven und energieneutralen Maßnahmen wie z.B. PCM-Putz der Vorzug gegeben werden. Gerade die durch den Ausstoß von Treibhausgasen verursachte globale Erwärmung könnte aber dazu führen, dass in Mittel- und Westeuropa tatsächlich eine Klimatisierung bestimmter Gebäude während der Sommermonate nötig wird.

Klimaanlagen sind aufgrund des hohen Energieverbrauchs nicht nur ökologisch bedenklich, sondern sie ziehen auch erhebliche Betriebskosten nach sich. Ein Einsatz von PCM-Putz in Kombination mit einer Teilklimatisierung könnte sowohl den Energiebedarf wie auch die Betriebskosten deutlich senken. Denkbar ist die Nutzung von kostengünstigem Nachtstrom zur Abkühlung von Raumluft und PCM-Putz in den frühen Morgenstunden.

Nomenklatur

Variablen / physikalische Größen:		Indizes:	
a [m ² /s]	Temperaturleitfähigkeit	a, e	außenliegend, in Kontakt mit der Außenluft
c [J/kgK]	spezifische Wärmekapazität	conv	konvektiv
d [m]	Bauteildicke, Ort	eff	effektiv
h [%]	Schmelzgrad	i	innenliegend, raumseitig
j [J/sm ²]	Energieflußdichte	l, liquid	flüssig
l [J/kg]	spezifische Latentwärme	latent	den Phasenübergang kennzeichnend
m [kg]	Masse	melt	Schmelz-(Temperatur)
p [N/m ²]	Druck	n	Ortschritt
t [s]	Zeit	OF	Oberfläche
u [J/kg]	spezifische Energie	op	operativ
x [m]	Ort	p	bei konstantem Druck
H [J]	Enthalpie	P	Phasenübergang
Q [J]	Wärmemenge	RL	Raumluft
Q̇ [W]	Wärmestrom	s, solid	fest
U [J]	innere Energie	s	(hochgestellt) Zeitschritt
V [m ³]	Volumen	sol	Erstarrungs-(Temperatur)
λ [W/mK]	Wärmeleitfähigkeit	Str.	Strahlung, hier: langwellige Wärmestrahlung
σ [kg/m ³]	Rohdichte	sub	unterkühlt
θ [°C]	Temperatur	V	bei konstantem Volumen
τ [s]	Zeitkonstante		
OF-TAV [-]	Oberflächentemperaturamplitudenverhältnis		
d* [m]	effektive Dicke		
Q _{eff} [J]	effektive Wärme		
t ₀ [s]	Periodendauer		

Literaturverzeichnis

- [1] Wärmeschutzverordnung: Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (idF v. 2.9.1994)
- [2] Energieeinsparverordnung: Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (idF v. 2.12.2004)
- [3] OESTERLE, L.; HEUSLER, L.: Doppelschalige Fassaden. München: Calley Verlag, 1999
- [4] KORNA DT, O.: Gebäude von morgen. Forschungsbericht der Philipp Holzmann AG. Philipp Holzmann AG, Frankfurt am Main: 1996
- [5] SCHWARZ, W.; LEISEWITZ, A. , UMWELTBUNDESAMT: Aktuelle und künftige Emissionen treibhauswirksamer fluoriertes Verbindungen in Deutschland / Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Frankfurt/Main: 1996 (Forschungsbericht 106 01 074/01)
- [6] SCHWARZ, W.: Anteil F-Gas Emissionen am globalen Klimawandel. www.oekorecherche.de/deutsch/berichte/berichteFrames.html (Stand: 1.7.2006)
- [7] Climate Change 2001; IPCC WORKING GROUP III: Mitigation. www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg3/index.htm (Stand: 1.7.2006)
- [8] Münchner Rückversicherungs-Gesellschaft: Wetterkatastrophen und Klimawandel. München: pg Verlag, 2005
- [9] Norm DIN 4108: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden
- [10] PÜLTZ, G.: Weather data as input for thermal simulations. 5th meeting of CIB W108 Climate change built environment, Bauhaus Universität Weimar. Weimar: Juni 2006
- [11] Arbeitstättenverordnung (idF v. 14.8.2004)
- [12] Landgericht Bielefeld (Urteil vom 16.04.03 AZ: 3O411-01)
- [13] SORGE, W.: VBI-Vortragsveranstaltung / „26°C in Arbeitsräumen – Klimatechnik statt Bauphysik?“, www.ifbsorge.de/news/news.php (Stand: 1.7.2006)
- [14] ASHRAE Standard 55-2004: Thermal environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta : ASHRAE, 2004
- [15] Norm DIN EN ISO 7730: Gemäßigtes Umgebungsklima - Ermittlung des PMV und des PPD und Beschreibung der Bedingungen für thermische Behaglichkeit
- [16] FANGER; P.: Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering. Malabar Florida : Robert E. Krieger Publishing, 1982
- [17] HELLWIG, R.: Thermische Behaglichkeit : Unterschiede zwischen frei und mechanisch belüfteten Bürogebäuden aus Nutzersicht. München, Technische Universität, Fakultät Architektur, Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik, Dissertation 2005
- [18] BOERSTRA, A. et al: A new dutch adaptive thermal comfort guideline. Proceedings Healthy Buildings 2003
- [19] BUX, K. ; Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Klima am Arbeitsplatz, Stand arbeitswissenschaftlicher Erkenntnisse – Bedarfsanalyse für weitere Forschungen. Dortmund: 2006 (Forschung Projekt F1987)
- [20] MAYER, E.: Ist die bisherige Zuordnung von PMV und PPD noch richtig? In: Luft- und Kältetechnik, 1998, Nr. 12, S. 575 - 577

- [21] ALAMDARI, F.; HAMMOND, G. P.: Improved data correlations for buoyancy-driven convection in rooms. In: CIBS series, Bd. 4, 1983, Nr. 3, S. 106 – 112
- [22] KHALIFA, A. J. N.; MARSHALL, R. H.: Validation of heat transfer coefficients on interior buildings surfaces using a real-sized indoor test cell. In: International journal of heat and mass transfer, Bd. 33, 1990, Nr. 10, S. 2219 - 2236
- [23] BEAUSOLEIL-MORRISON, I.: The adaptive simulation of convective heat transfer at internal building surfaces. In: Building and Environment, Bd. 37, 2002, S. 791 - 806
- [24] HERING, E.; MARTIN, R.; STOHRER, M.: Physik für Ingenieure. 6. Aufl. Berlin : Springer-Verlag, 1997
- [25] MEHLING, H.: Latentwärmespeicherung: Neue Materialien und Materialkonzepte (Forschungs-Verbund Sonnenergie, Workshop 2001 – Wärmespeicherung). Köln: 28 - 29. 5. 2001
- [26] FRYSSINGER, G. A.; SLIWKOWSKI, J.: Phase Change Material Storage Assisted Heating Systems. University of Delaware, PH-87-5, No.4, pp516, 1987
- [27] LANE et al: Solar heat storage: Latent materials Vol.1: Background and scientific principles. CRC Press, Florida: 1981
- [28] ZIEGENBEIN, B.: The BBC solar house – Design and experience. In: Solar Energy, 1977, Februar, S. 38 - 40
- [29] <http://freespace.virgin.net/m.eckert/index.htm> (Stand: 1.7.2006)
- [30] www.cristopia.com (Stand: 1.7.2006)
- [31] BO, H.; GUSTAFSSON, M. E.; SETTERWALL, F.:Tetradecane and hexadecane binary mixtures as phase change materials (PCMs) for cool storage in district cooling systems. In: Energy Bd. 24, 1999, Nr. 12, S. 1015 - 1028
- [32] www.lwsnet.info Stand: 1.7.2006
- [33] PELLETRET, R.; BERGER, X.; DEVAL, J. C.; CNRS ; CSTB: Le store venitien à chaleur latente (Compte Rendu de la Conférence Internationale sur Architecture Solaire, Paris 1983). Paris : 1983, S. 435-440
- [34] Telefonische Auskunft : Griesser Gruppe, Storen und Rolladen, 14.7.2005
- [35] RAUZIER, E.; CNRS ; Groupe Ecothermique Solaire: Etude d'un élément de paroi industriel capteur et stockeur (Compte Rendu de la Conférence Internationale sur Architecture Solaire 1983). Paris: 1983, S. 430 - 434
- [36] JAFFRIN, A.; VION, J. P.: Stockage de chaleur solaire dans une dalle à chaleur latente (Compte Rendu de la Conférence Internationale sur Architecture Solaire Paris 1983). Paris: 1983, S. 441 - 448
- [37] MANZ, H.: Sonnenstrahlungsbeladene Latentwärmespeicher in Gebäudefassaden, Dissertation an der ETH Zürich, 1996
- [38] LENZEN, B.: Entwicklung und Untersuchung eines latentwärmespeichernden Baumaterials zum Einsatz in transparent gedämmten Außenwänden. Düsseldorf : VDI-Verlag, 2002
- [39] ZALBA, B.; MARIN, J. M.; CABEZA, L. F.; MEHLING, H.: Free-cooling of buildings with phase change materials. In: International Journal of Refrigeration, Bd. 27, 2004, S. 839 - 849
- [40] www.rubitherm.com (Stand: 1.7.2006)
- [41] Persönliches Gespräch am 15.6.2006 mit Paul Hancock, Bailey Group, Manchester

- [42] SCALAT, S.; BANU, D.; HAWES, D.; PARIS, J.; HAGHIGHATA, F.; FELDMAN, D.: Full scale thermal testing of latent hest storage in wallboard. In: Solar Energy Materials and Solar Cells, Bd. 44, 1996, S. 49 – 61
- [43] FEUSTEL, E.; STETIU, C.: Thermal Performance of Phase Change Wallboard for Residential Cooling. Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, 1997
- [44] YANBING, K.; YI, J.; YINPING, Z.: Modelling and experimental study on an innovative passive cooling system-NVP system. In: Energy and Building, Bd. 35, 2003, S.417 - 425
- [45] http://www.zae.physik.tu-muenchen.de/zae/specials/symposium_2004.html (Stand: 1.7.2006)
- [46] <http://www.zae.physik.tu-muenchen.de/zae/specials/vortraege/07-WAREMA.pdf> (Stand: 1.7.2006)
- [47] http://www.zae.physik.tu-muenchen.de/zae/specials/vortraege/08-Hummel_Gipsplatten.pdf (Stand: 1.7.2006)
- [48] JAHNS, E. ; IEA ; ECES ; Annex 10 (Hrsg.): Microencapsulated Phase Change Material (Phase Change Materials and Chemical Reactions for Thermal Energy Storage 4th Workshop). Benediktbeuren: 28 - 29 October 1999
- [49] http://www.zae.physik.tu-muenchen.de/zae/specials/vortraege/12-Hill_maxit_clima.pdf (Stand: 1.7.2006)
- [50] SCHOSSIG, P. ; HENNING, H.-M. ; RAICU, A. ; Ostbayrisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (Veranstalter): Mikroverkapselte Phasenwechselmaterialien in Wandverbundsystemen (11. Symposium Thermische Solarenergie). Regensburg: 2001
- [51] www.3lh.de (Stand: 20.7.2005)
- [52] SCHOSSIG, P.; HENNING, H.-M.; RAICU, A.; HAUSSMANN, T. ; Ostbayrisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (Veranstalter): Mikroverkapselte Phasenwechselmaterialien in Wandverbundsystemen zur Komfortsteigerung und Energieeinsparung (12. Symposium Thermische Solarenergie). Bad Staffelstein: 2002 – Tagungsband
- [53] FISCHER, S.: Zur numerischen Berechnung von Wärmeleitvorgängen mit dem Phasenübergang fest-flüssig. In: Luft- und Kältetechnik, Bd. 2, 1985, S. 81 - 85
- [54] RADHAKRISHNAH, K. B.; BALAKRISHNAN, A. R.: Heat transfer analysis of thermal energy storage using phase change materials. In: Heat recovery systems & CHP, Bd. 12, 1992, Nr. 5, S. 427 - 435
- [55] EGOLF, P. W.; MANZ, H.: Theory and modelling of phase change materials with and without mushy regions. In: International Journal Heat and Mass Transfer, Bd. 18, 1994, S. 2917 - 2924
- [56] MATSUMOTO, M.; HOKOI, S.; HATANO, M.: Model for simulation of freezing and thawing processes in building materials. In: Building and Environment, Bd. 36, 2001, S. 733 - 742
- [57] GLÜCK, B.: Kühlung mittels raumintegriertem Latentwärmespeicher/ Teil1 und 2. In: Heizung, Lüftung, Klima, Haustechnik, Bd. 53, 2002, Nr. 11 / 12
- [58] PIETZSCH, R.: Thermophysikalische Modelle für Wärmeübertrager mit Latentwärmespeichern. In: Luft- und Kältetechnik, Bd. 7, 2003, S. 311 - 316
- [59] JOKISALO, J. ; LAMBERG, P. ; SIRÉN, K. ; IEA ; ECES ; Annex 10 (Hrsg.): Suitability of building construction materials in short-term energy storage - office room simulations (Phase Change Materials and Chemical Reactions for Thermal Energy Storage 3rd Workshop). Helsinki: 27 - 28 Mai 1999

- [60] HEIM, D.: Modelling building elements with the application of phase change materials (4th International Ph.D. Symposium in Civil Engineering 2002). Munich : Springer, VDI-Verlag, 2002 – Sonderausgabe
- [61] HEIM, D.; CLARKE, J. A.: Numerical modelling and thermal simulation of PCM-gypsum composites with ESP-r. In: Energy and Buildings, Bd. 36, 2004, S. 795 – 805
- [62] KORNADT, O.; RUDOLPH, R.; GÜRLEBECK, K.: Absenkung von Raumlufttemperaturen in Hitzeperioden. WKSB, 2002, Nr. 49, S. 7 - 12
- [63] VÖLKER, C.: Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses von PCM auf die Raumlufttemperatur; Diplomarbeit, Bauhaus-Universität Weimar 2005
- [64] VÖLKER, C.; KORNADT, O.: Experimentelle und numerische Untersuchung zur Reduktion sommerlicher Überhitzung durch Phasenübergangsmaterialien; In: WKSB 56, September 2006, S. 3 - 9
- [65] HOFFMANN, S. ; KORNADT, O.: An investigation on phase change materials to reduce summer overheating (esim2006:The bi-annual conference of IBPSA Canada), Toronto, 2006 (<http://www.esim.ca/2006/papers.htm>)
- [66] LANDAU, L.D.; LIFSCHITZ, E.M.: Lehrbuch der theoretischen Physik: Statistische Physik. Berlin: Akademie-Verlag, 1966
- [67] KLUGE, G.; NEUGEBAUER, G.: Grundlagen der Thermodynamik: mit 31 Tabellen. Heidelberg: Spektrum Verlag, 1994
- [68] MERKER, O.: Experimentelle und theoretische Untersuchung eines PCM-Sonnenschutz-Verbundsystems: Berichte aus der Physik. Aachen: Shaker Verlag, 2003
- [69] SCHNAKENBERG, J.: Thermodynamik und statistische Physik, Vorlesungsunterlagen Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule. Aachen: 1998
- [70] HECKENKAMP, J. ;BAUMANN, H.: Latentwärmespeicher. Weinheim: Nachrichten aus Chemie, Technik und Laboratorium, Wiley-VCH, Bd. 45/11, S. 1075-1081, 1997
- [71] KRUSE, M. ; FRIEDRICH, U.: Latentwärmespeicher in Baustoffen. Bonn: BINE Fachinformationsdienst, 06/2002
- [72] MEHLING, H.: Latentwärmespeicher. Bonn: BINE Fachinformationsdienst, 04/2002
- [73] MEHLING, H.: Latentwärmespeicherung: Neue Materialien und Materialkonzepte. Forschungs-Verbund Sonnenergie: Workshop 2001 – Wärmespeicherung, S. 49-64 (www.fv-sonnenenergie.de)
- [74] LENZEN, B.: Entwicklung und Untersuchung eines latentwärmespeichernden Baumaterials zum Einsatz in transparent gedämmten Außenwänden. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2002
- [75] ZHANG, X. X.; FAN, Y. F.: Fabrication and properties of microcapsules and nanocapsules containing n-octadecane. In: Materials chemistry and physics: including materials science communications, Bd. 88, 2004, Nr. 2 - 3, S. 300 - 307
- [76] <http://www.maxit.de/>
- [77] Persönliche Gespräche von Januar 2003 - November 2004 mit Dr. H.-J. Flammersheim, Institut für physikalische Chemie, Friedrich-Schiller-Universität Jena
- [78] http://www.zae.physik.tu-muenchen.de/zae/specials/vortraege/15-Hiebler_Passive_Kuehlung_PCM.pdf Stand: 1.7.2006

- [79] FLAMMERSHEIM, H.-J.; HEMMINGER, W.; HÖHNE, G.W.H.: Differential scanning calorimetry : an introduction for practitioners : with 13 tables. Berlin: Springer-Verlag, 1996
- [80] Interner Bericht M. Ostry, Bauhaus-Universität Weimar – VUT Brno, Sommer 2004
- [81] HILBIG, G.; RUDOLPH, R.: Das Temperaturamplitudenverhältnis - Eine kritische Wertung. In: wksb, Jg. 41 (1996) Nr.38, S.16-20
- [82] HILBIG, G. ; RUDOLPH, R.: Das Temperaturamplitudenverhältnis zwei- und dreischaliger Wände - Rechenbeispiele. In: wksb, Jg. 42 (1997) Nr. 39, S. 21-27
- [83] ÖZISKI, N. M.: Heat Conduction. New York: John Wiley & Sons, 1980
- [84] ÖZISKI, N. M.: A Note on the General Formulation of Phase Change Problem as Heat Conduction Problem with a Moving Heat Source. In: Journal of heat transfer, Bd. 100, 1978, Nr. 2, S. 370 - 371
- [85] CRANK, J.; NICHOLSON, P.: A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equation of the heat-conduction type. In: Proceedings of the Cambridge Philosophical Society (PCPS); Bd. 43, 1947, S. 50 - 67
- [86] ELSNER, N.: Grundlagen der Technischen Thermodynamik / Bd. 2: Wärmeübertragung. grundlegend überarb. und erg. Auflage. Berlin : Akademiker Verlag, 1993
- [87] STEFAN, J.: Über die Theorie der Eisbildung insbesondere über die Eisbildung im Polarmeer. In: Annalen der Physikalischen Gesellschaft, Bd. 42, 1891, S. 269 - 286
- [88] HENSEN, J. L.M.; NAKHI, A.: Fourier and Biot Numbers and the accuracy if conduction modelling (Building Environmental Performances 1994). York: April 1994
- [89] SAMARSKIJ, A.: Theorie der Differenzenverfahren. Leipzig : Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G., 1984
- [90] FRITZSCH, E.: Numerische Untersuchung des Temperaturprofils in einer PCM-Wand, Diplomarbeit Bauhaus-Universität Weimar, 2005
- [91] www.esru.strath.ac.uk (Stand: 1.7.2006)
- [92] DALER, R. et al.: Bestandsaufnahme von Einrichtungen zur freien Lüftung im Wohnungsbau. Forschungsbericht BMFT FB T 84-028. Eggenstein-Leopoldshafen: Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik, 1984.
- [93] CLARKE, J.: Energy simulation in building design. Oxford: Butterworth-Heinemann, second edition, 2001
- [94] BLÜMEL, K.; HOLLAN, E.; JAHN, A.; KÄHLER, M.; PETER, R.: Entwicklung von Testreferenzjahren (TRY) für Klimaregionen der Bundesrepublik, Forschungsbericht T86-051, Bundesministerium für Forschung und Technologie, 1986
- [95] LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C.: Daily insolation on surfaces tilted towards the equator, In: ASHRAE Journal, Bd. 3, 1961, S. 53 ff
- [96] PAGE, J. K.: The estimation of monthly mean values of daily total short wave radiation on vertical an inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40°N - 40°S Proceedings UN Conference on New Sources of Energy, Paper No. 35/5/98, 1961
- [97] ERBS, D. G.; KLEIN, S. A.; DUFFIE, J. A.: Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. In: Solar Energy Bd. 28, 1982, S. 293 - 302
- [98] HEIDT, F.-D.: Energetische Bewertung der Orientierung von Gebäudeaußenflächen mit Hilfe horizontaler Globalstrahlungsdaten In: Bauphysik, H. 6, 1985, S. 178 ff.

- [99] HOFFMANN, S.; WALDHELM, B. ; KORNADT, O.: Verbesserung des sommerlichen Wärmeschutzes - Phasenübergangsmaterialien zur Wärmespeicherung in Leichtbauten. Revitalisierung von Bauwerken, Schriftenreihe der Bauhaus-Universität Weimar SR 117, Veröffentlichungen des Sonderforschungsbereiches SFB 524 „Werkstoffe und Konstruktionen für die Revitalisierung von Bauwerken“ 2004/2005, ISBN 3-86068-248-2
- [100] HOFFMANN, S.; KORNADT, O.: Phasenübergangsmaterialien (PCM) als Latentwärmespeicher in Revitalisierungsobjekten. Revitalisierung von Bauwerken, Schriftenreihe der Bauhaus-Universität Weimar SR 119, Veröffentlichungen des Sonderforschungsbereiches SFB 524 „Werkstoffe und Konstruktionen für die Revitalisierung von Bauwerken“ 2005/2006, ISBN 3-86068-286-5
- [101] WALDHELM, B.; KORNADT, O.: Einfluss von Phasenübergangsmaterialien zur Verbesserung des Raumklimas. In: WKSB 54, September 2005, S. 28 - 31
- [102] LUTHER, P.: Untersuchung des thermischen Verhaltens von zwei Klimakammern unter Einbeziehung der äußeren Zwänge. Studienarbeit Bauhaus-Universität Weimar, 2004
- [103] HOFFMANN, S.; KORNADT, O.: Simulation of Phase Change Materials – Validation of the Numerical Model; IBPSA Germany, Bausim 2006. München: 2006
- [104] HOFFMANN, S.; KORNADT, O.: Sommerlicher Wärmeschutz eines Mehrfamilienhauses aus den 50er unter Berücksichtigung des Nutzerverhaltens. In: Bauphysik, August 2004, H. 4, S. 189 - 196
- [105] DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A.: Solar engineering of thermal processes. Hoboken, NJ : Wiley, 2006
- [106] HOFFMANN, S.; KORNADT, O.: Phase change materials against indoor overheating. 4th CIB W 108 Meeting on Climate Change and the Built Environment, CSTB. Paris: April 2005
- [107] HOFFMANN, S.; KORNADT, O.: DWD-TRYs and HadRM3-TRYs – a comparison for Munich and Weimar. 5th CIB W 108 Meeting on Climate Change and the Built Environment, Bauhaus-Universität Weimar. Weimar: Juni 2006
- [108] HOFFMANN, S.; KORNADT, O.: Anforderungen an Gebäude durch langfristigen Klimawandel, Weimarer Bauphysiktag 2005. Weimar: Oktober 2005
- [65] HOFFMANN, S. ; KORNADT, O.: An investigation on phase change materials to reduce summer overheating (esim2006:The bi-annual conference of IBPSA Canada), Toronto, 2006 (<http://www.esim.ca/2006/papers.htm>)

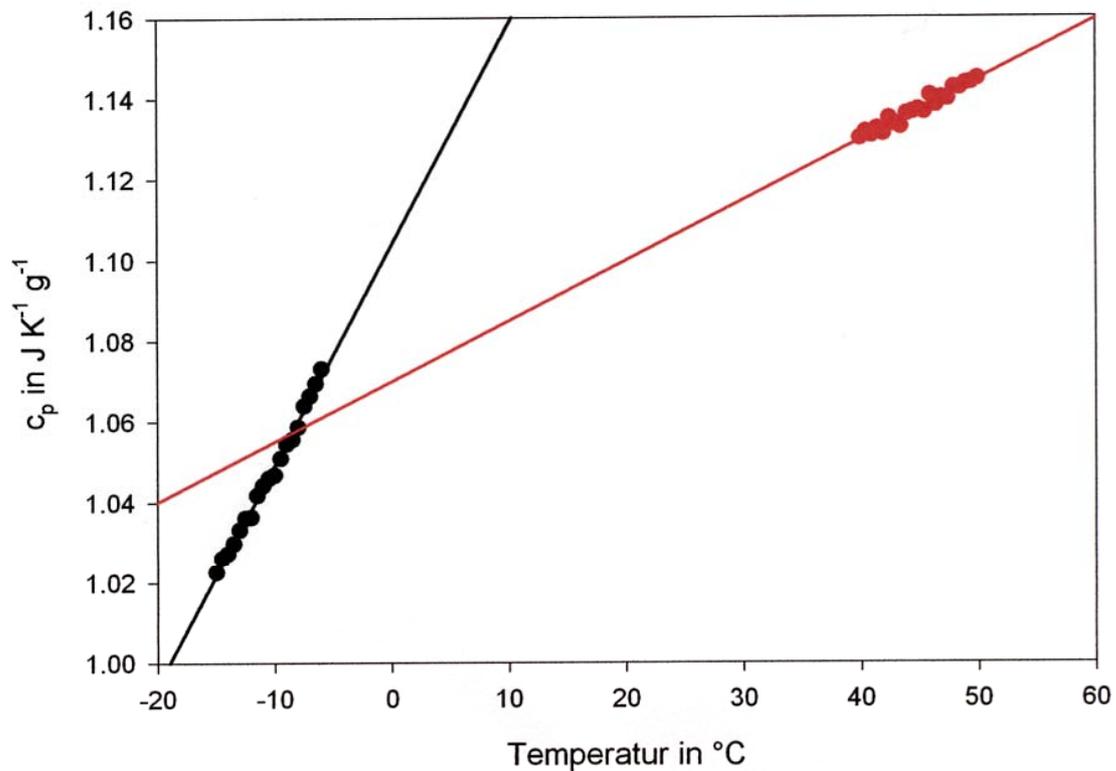
ANHANG 1

Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität unterhalb und oberhalb des Phasenübergangsbereichs mittels Differential Scanning Calorimetry

(Physikalisch-technisches Institut der Friedrich Schiller Universität Jena)

PCM-haltiger Gipsputz 20 %

11.03.2003



Punkte: Einzel-DSC-Messungen
Linien: Lineare Extrapolation

c_p -Funktionen:

unterhalb der Umwandlung (-15 bis -6 °C):

$$5 \text{ K min}^{-1}: c_p = (1.10389 + 5.47e-3 * T/K) \text{ J K}^{-1} \text{ g}^{-1}; r^2 = 0.9936$$

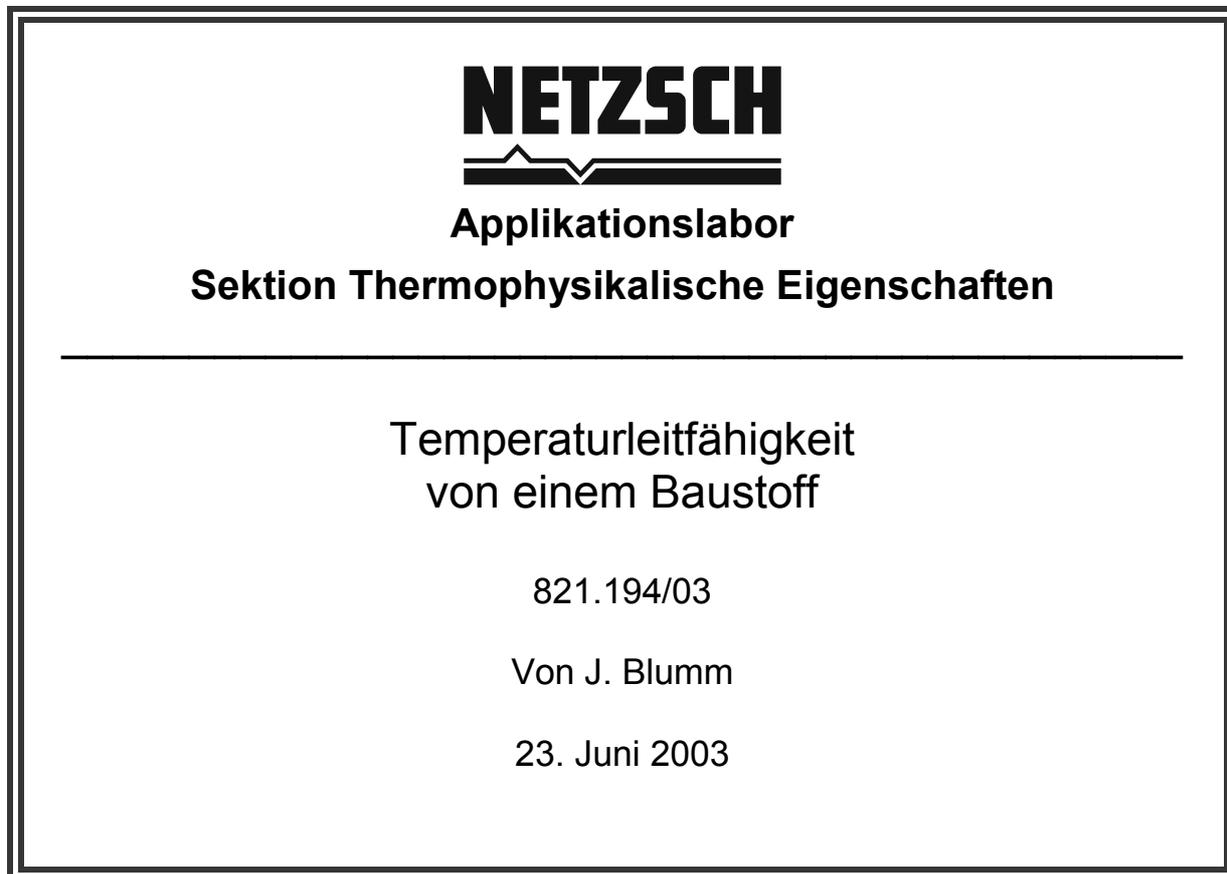
oberhalb der Umwandlung (40 bis 50 °C):

$$5 \text{ K min}^{-1}: c_p = (1.070 + 1.49e-3 * T/K) \text{ J K}^{-1} \text{ g}^{-1}; r^2 = 0.9523$$

(Genauigkeit der Einzelmessungen bei c_p : $\pm 3\%$)

Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit des PCM-Putzes mittels Laser-Flash-Verfahren

Messbericht der Fa. Netzsch



Einleitung

Die Sektion Thermophysikalische Eigenschaften des NETZSCH-Applikationslabors erhielt einen Baustoff von der Bauhaus Universität Weimar zur Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit.

Die Temperaturleitfähigkeit wurde mit einer Laser-Flash-Apparatur NETZSCH-LFA 427 gemessen. Das für diese Messungen benutzte Gerät war mit einem wassergekühlten Hochtemperaturofen mit Graphitheizelement für Messungen im Temperaturbereich von 15 bis 2000°C ausgestattet. Probenraum und Ofenraum sind durch ein Schutzrohr voneinander getrennt, sodass Messungen unter Vakuum sowie oxidierender, reduzierender oder inerte Atmosphäre möglich sind. Der Temperaturanstieg auf der Rückseite der Probe wird mit einem Infrarotdetektor (InSb) gemessen. Für die manuelle oder vollautomatische Steuerung des Versuchsablaufs sowie Datenerfassung und -auswertung steht ein umfangreiches MS[®]-Windows[™]-Softwarepaket für PC zur Verfügung. Eingebaute mathematische Modellfunktionen ermöglichen Korrekturrechnungen bei "finite pulse"- und "heat loss"-Effekten. Ebenso können die Temperaturleitfähigkeit von 2- oder 3-schichtigen Proben und der Kontaktwiderstand bei 2-schichtigen Proben berechnet werden.

Ergebnisse und Diskussion

Zunächst wurden Laserflash-Messungen an drei unterschiedlichen Proben durchgeführt. Danach wurde eine Probe zwischen 16 und 39°C temperaturabhängig untersucht. Alle Proben wurden vorab mit Grafit beschichtet, um eine bessere Absorption des Laserpulses sowie eine bessere Emission auf der Probenrückseite zu gewährleisten. Die Messungen wurden unter Luft durchgeführt. Bei jeder Temperaturstufe wurden fünf Einzelmessungen durchgeführt. Die aufgeführten Tabellen enthalten die Mittelwerte bei den entsprechenden Temperaturen.

In Tabelle A1-1 sind die Ergebnisse für die Temperaturleitfähigkeit drei unterschiedlicher Proben bei 20°C dargestellt. Es ergaben sich nur geringfügig Unterschiede in den Messergebnissen.

Probe	Temperaturleitfähigkeit / mm ² /s
1	0.165
2	0.173
3	0.171

Tab. A1-1: Temperaturleitfähigkeit von drei verschiedenen Proben bei 20°C

Tabelle A1-2 zeigt die Ergebnisse an Probe 3 in Abhängigkeit von der Temperatur. Der Einfluss der Phasenumwandlung um 20°C ist klar zu erkennen. Die Messungen bei 16 und 19°C wurden an einer Probe vorgenommen, die vorab 2 Stunden bei 15°C gelagert war. Dadurch konnte der Abschluss der Phasenumwandlung sichergestellt werden. Die Messungen bei 20°C und höher wurden an einer Probe vorgenommen, die bei Raumtemperatur (25°C) gelagert war.

Temperatur / °C	Temperaturleitfähigkeit / mm ² /s
16	0.262
19	0.238
20	0.171
24	0.172
29	0.177
34	0.177
39	0.175

Tab. A1-2: Temperaturleitfähigkeit von Probe 3

ANHANG 2

Bestimmung der spezifischen Latentwärme und der Peak-Temperatur θ_2 mittels Differential Scanning Calorimetry (Physikalisch-technisches Institut der Universität Jena)

DSC-Messung Nr.	Datum der Messung	Masse des Probekörpers [mg]	l [kJ/kg]	Peak-Temperatur θ_2 [°C]	Aufheizrate [K/min]	Heizlauf
(01)	28.01.2003	55.3	14.78	29.00	2	2.
(02)	28.01.2003	62.9	13.37	29.19	2	2.
(03)	28.01.2003	58.9	15.53	28.89	2	2.
1	28.01.2003	11.7	17.53	28.10	2	2.
2	28.01.2003	11.9	17.53	28.11	2	2.
3	28.01.2003	11.9	17.55	28.10	2	3.
4	28.01.2003	3.2	15.78	27.88	2	2.
5	28.01.2003	3.2	15.81	27.86	2	3.
6	28.05.2004	3.8	17.30	28.10	1	
7	28.05.2004		13.68	28.13	1	
8	28.05.2004		15.63	28.12	1	
9	15.06.2004		17.56	28.14	1	
10	1.11.2004	5.7	16.64	28.13	1	1.
11	1.11.2004	5.7	16.68	28.09	1	2.
12	1.11.2004	5.7	16.57	28.18	1	1.
13	1.11.2004	5.7	16.11	28.16	1	2.
14	1.11.2004		16.23	28.140	1	1.
15	1.11.2004	6.2	17.55	28.14	1	1.
16	1.11.2004	6.2	17.60	28.10	1	2.

Tab. A2: 16 DSC-Messkurven, die als Grundlage für die Approximation der Funktion $c(\theta)$ dienen + 3 Messungen mit hoher Probenmasse

Bei Probenmassen < 12 mg verschmiert der DSC-Kurvenverlauf. Die in den Messungen (01), (02) und (03) gemessenen Peak-Temperaturen liegen ca. 1 K über der Peak-Temperatur, die bei kleineren Probenmassen festgestellt wird.

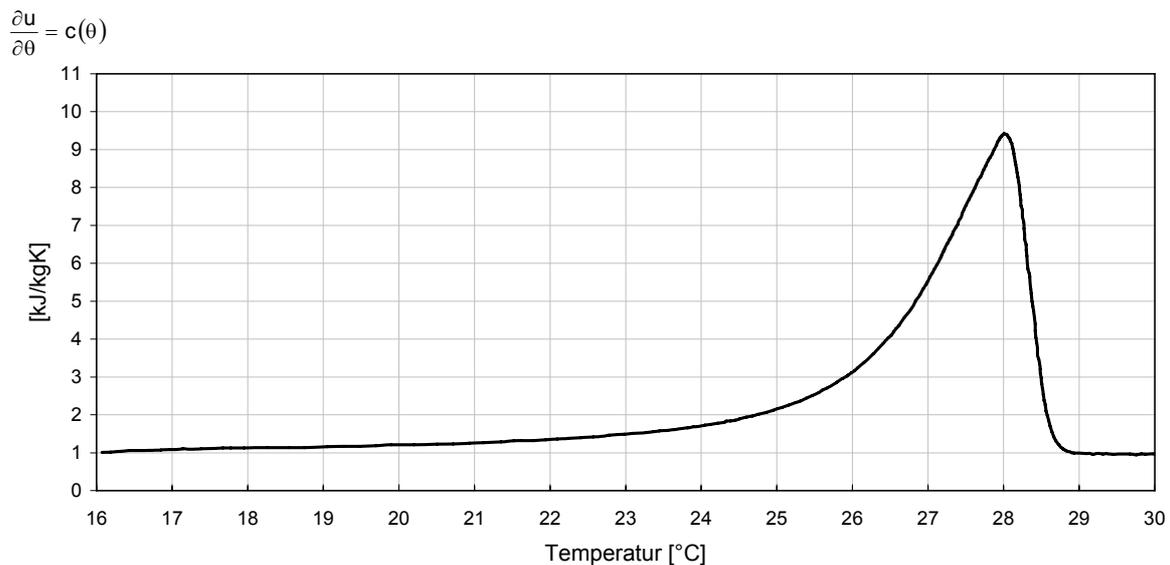


Abb. A2-1: $c(\theta)$ basierend auf DSC-Messung Nr. 1, Tab. A2

$$\frac{\partial u}{\partial \theta} = c(\theta)$$

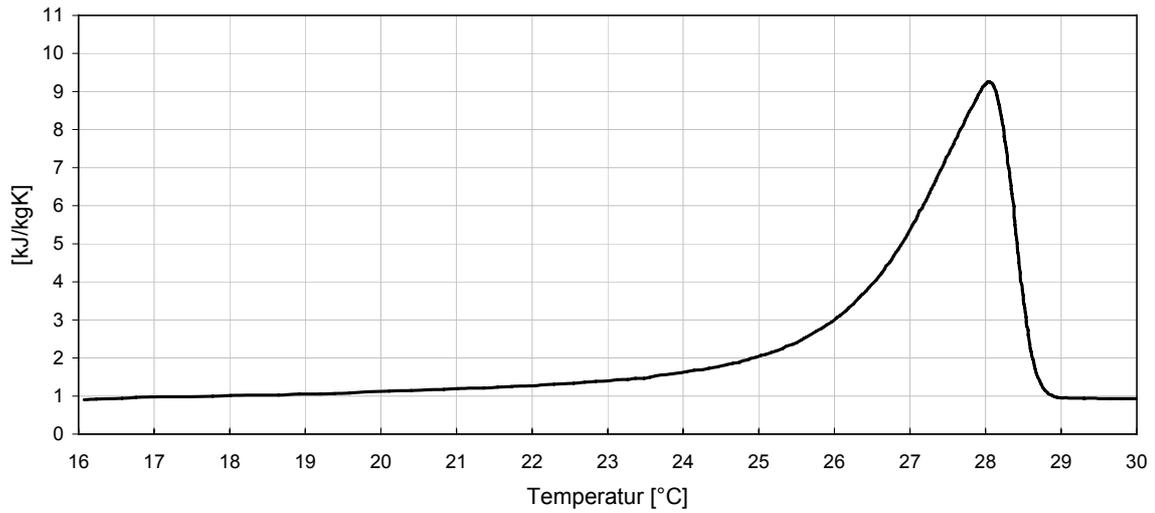


Abb. A2-2: $c(\theta)$ basierend auf DSC-Messung Nr. 2, Tab. A2

$$\frac{\partial u}{\partial \theta} = c(\theta)$$

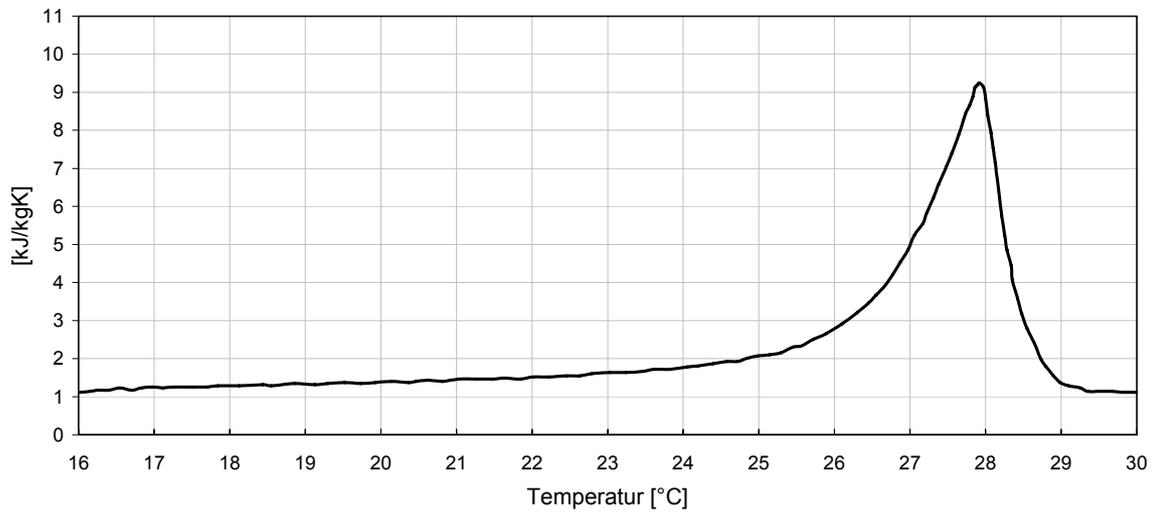


Abb. A2-3: $c(\theta)$ basierend auf DSC-Messung Nr. 3, Tab. A2

$$\frac{\partial u}{\partial \theta} = c(\theta)$$

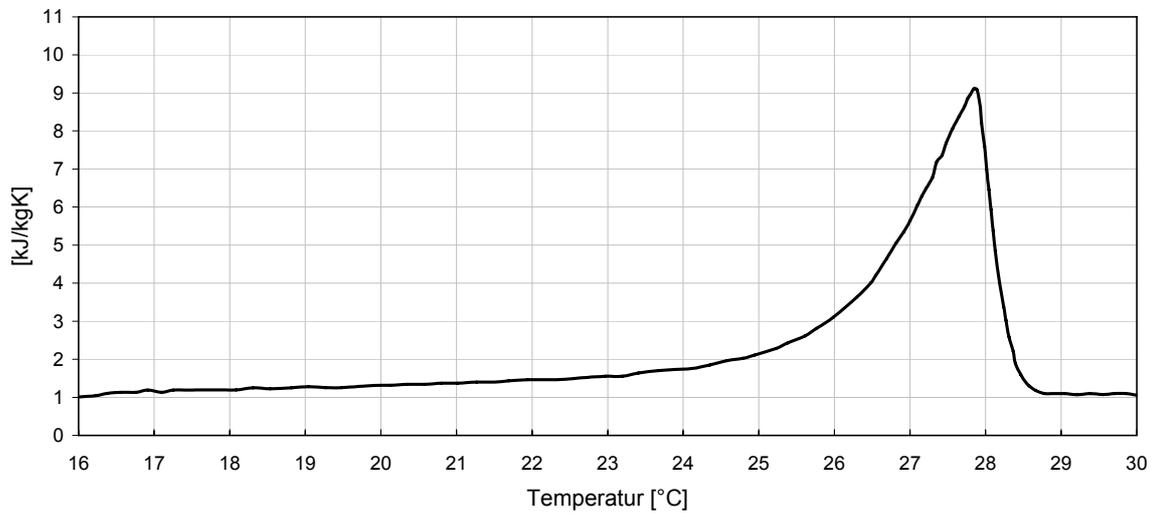


Abb. A2-4: $c(\theta)$ basierend auf DSC-Messung Nr. 4, Tab. A2

$$\frac{\partial u}{\partial \theta} = c(\theta)$$

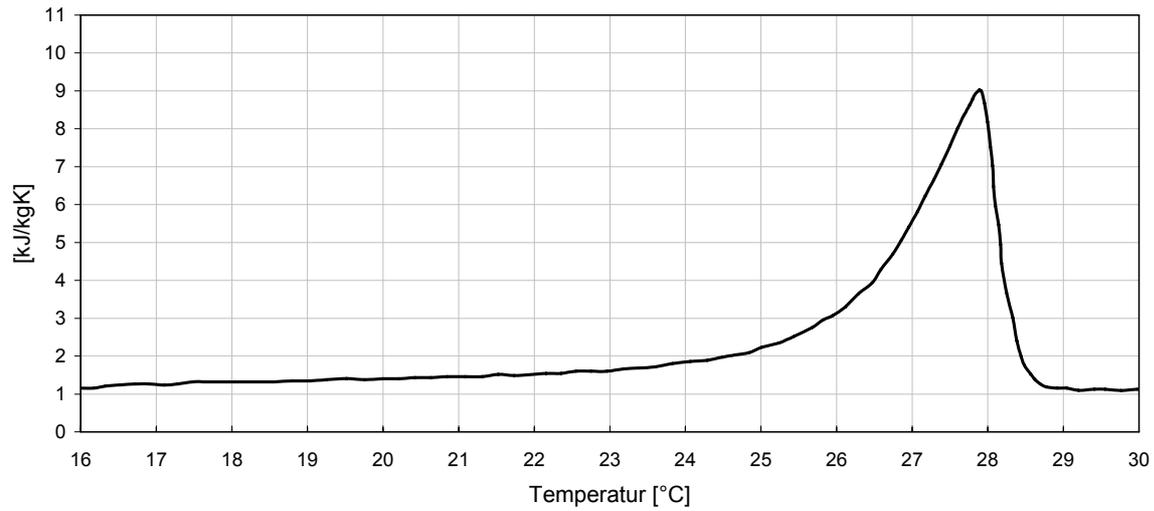


Abb. A2-5: $c(\theta)$ basierend auf DSC-Messung Nr. 5, Tab. A2

$$\frac{\partial u}{\partial \theta} = c(\theta)$$

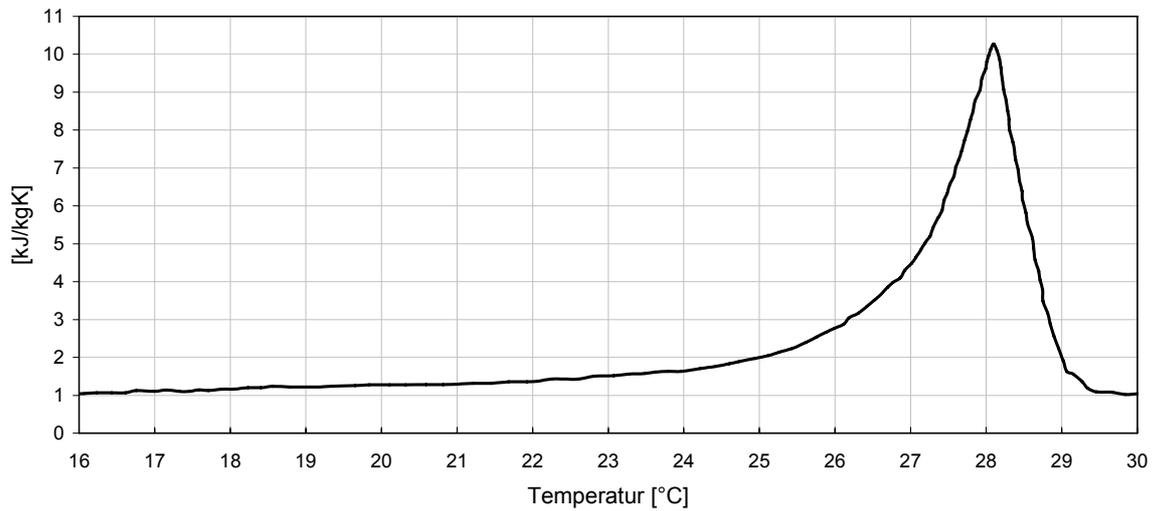


Abb. A2-6: $c(\theta)$ basierend auf DSC-Messung Nr. 6, Tab. A2

$$\frac{\partial u}{\partial \theta} = c(\theta)$$

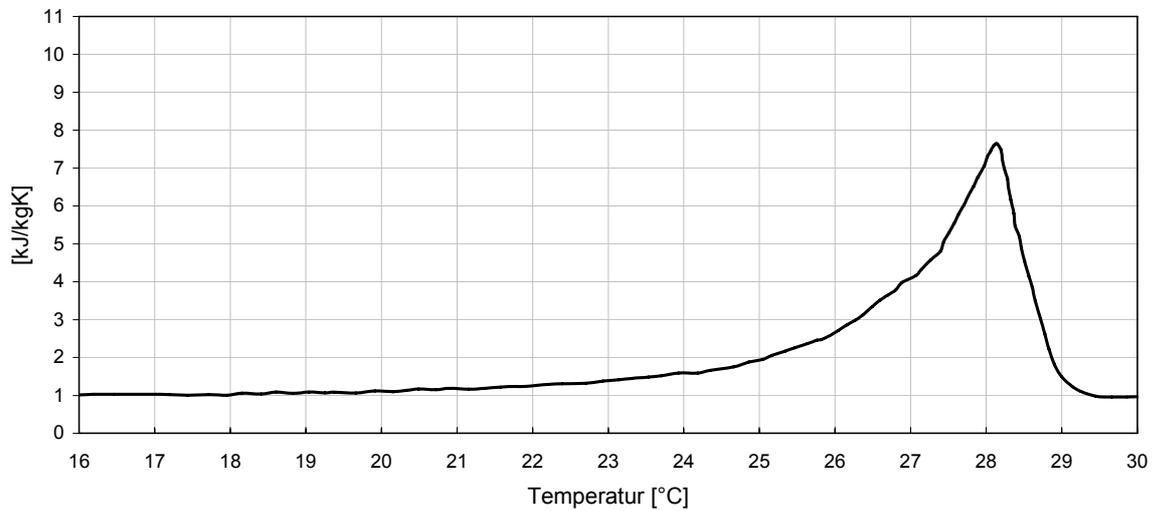


Abb. A2-7: $c(\theta)$ basierend auf DSC-Messung Nr. 7, Tab. A2

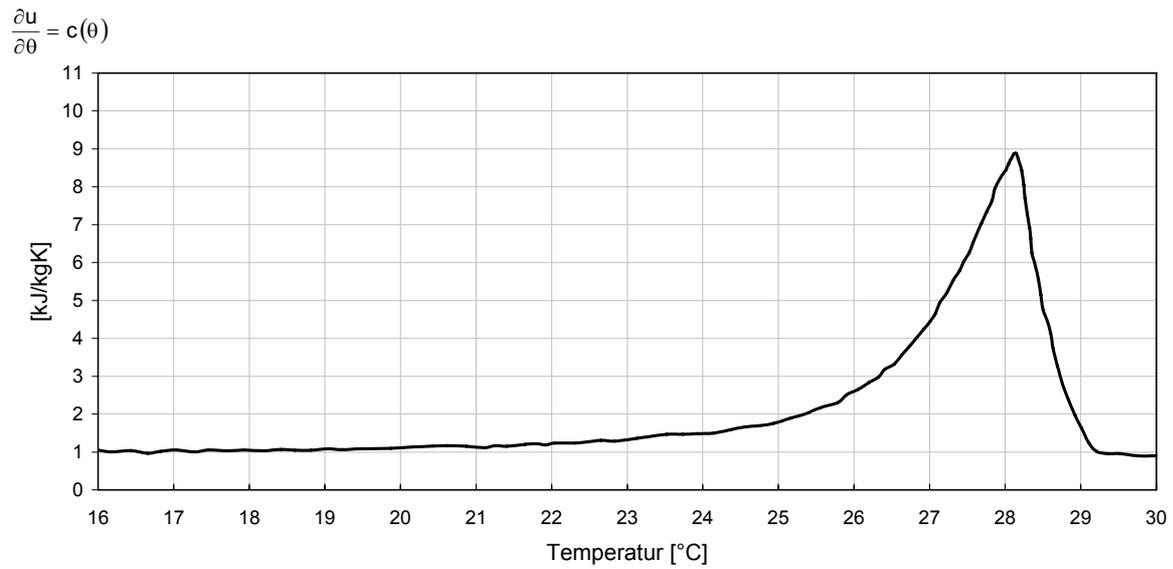


Abb. A2-8: $c(\theta)$ basierend auf DSC-Messung Nr. 8, Tab. A2

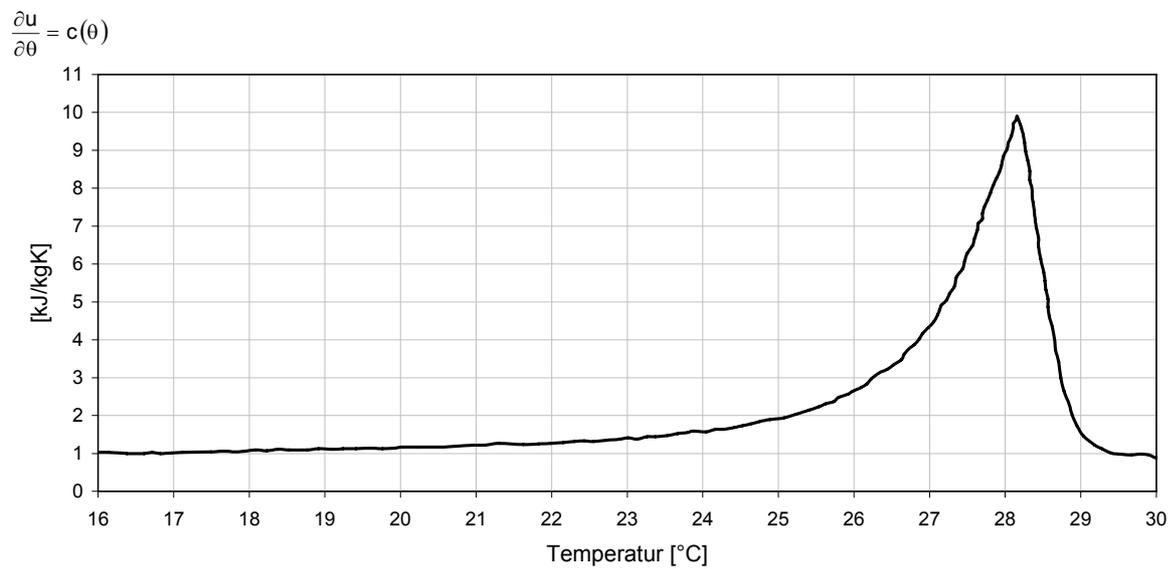


Abb. A2-9: $c(\theta)$ basierend auf DSC-Messung Nr. 9, Tab. A2

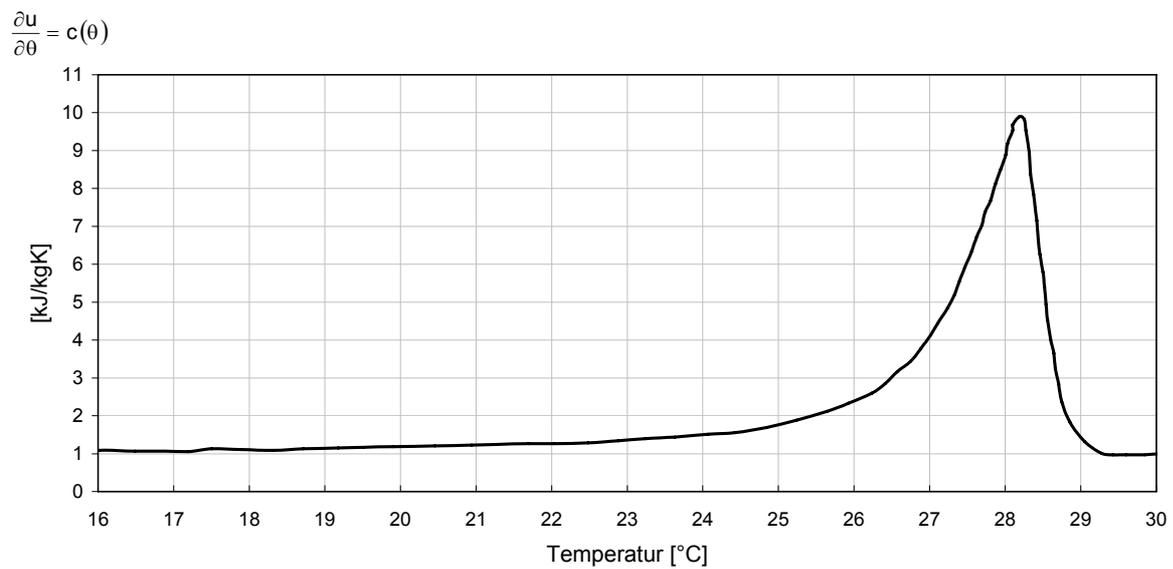


Abb. A2-10: $c(\theta)$ basierend auf DSC-Messung Nr. 10, Tab. A2

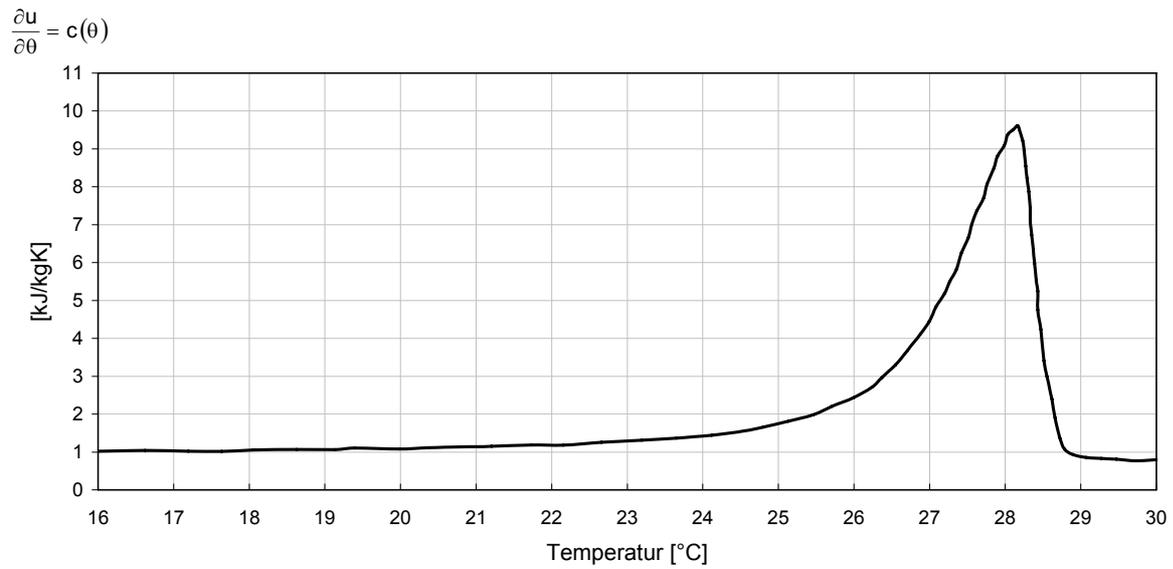


Abb. A2-11: $c(\theta)$ basierend auf DSC-Messung Nr. 11, Tab. A2

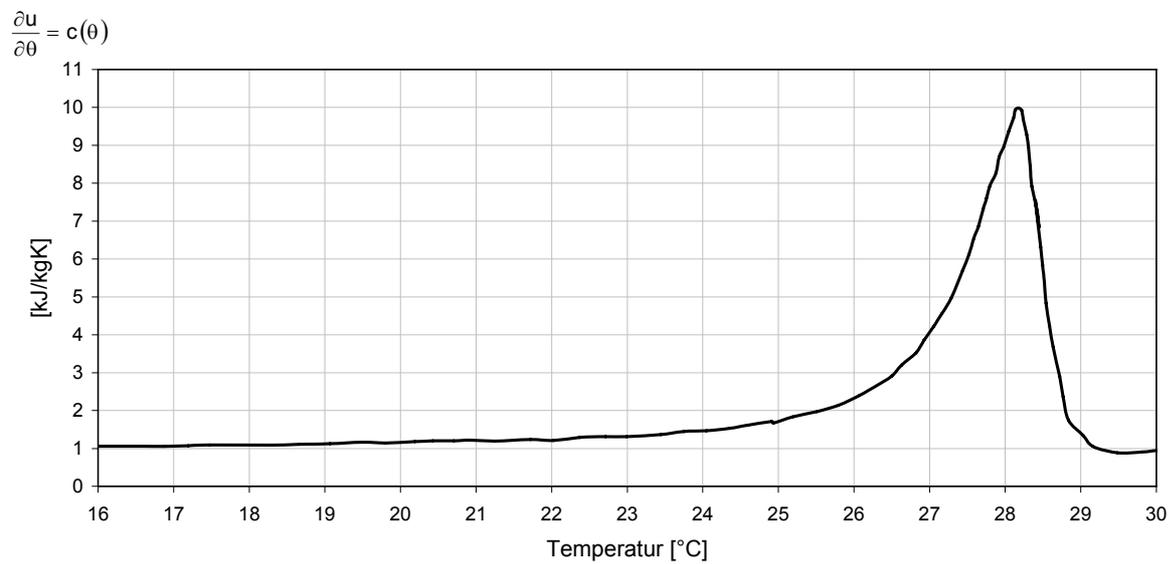


Abb. A2-12: $c(\theta)$ basierend auf DSC-Messung Nr. 12, Tab. A2

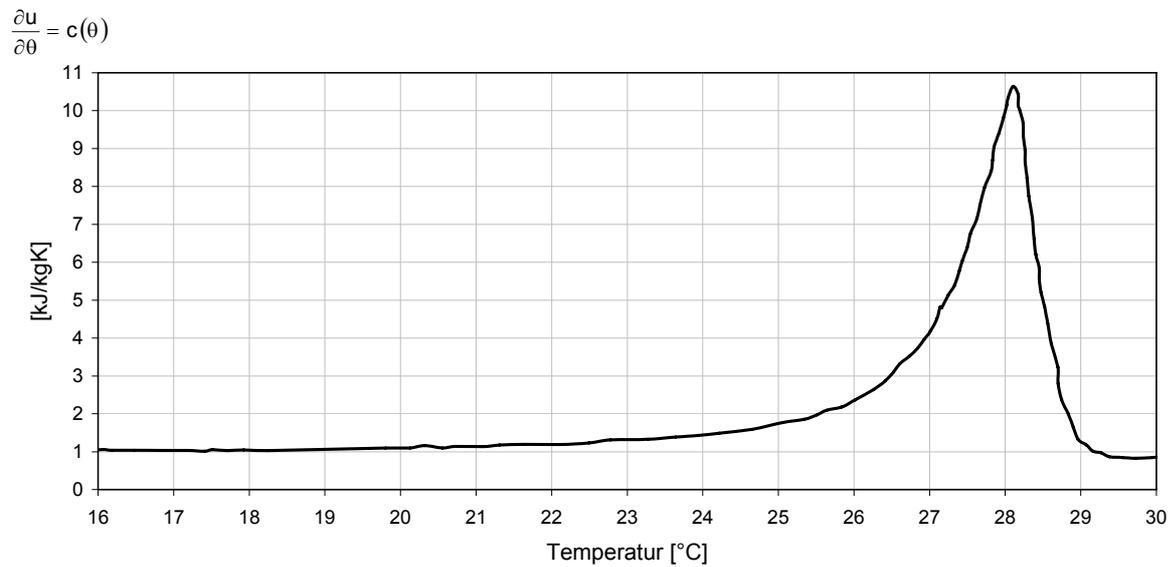


Abb. A2-13: $c(\theta)$ basierend auf DSC-Messung Nr. 13, Tab. A2

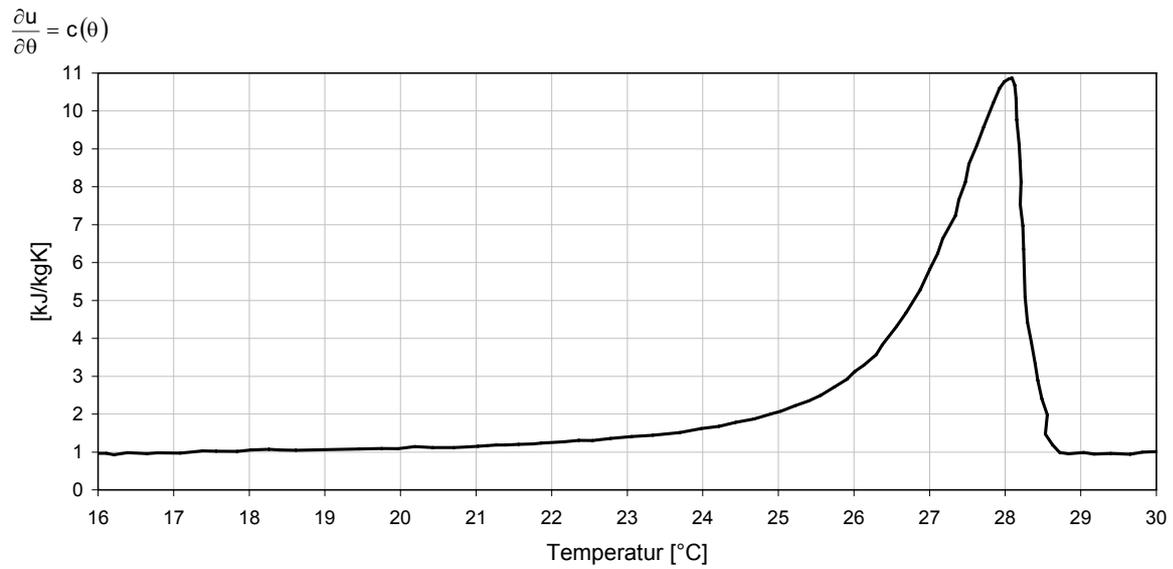


Abb. A2-14: $c(\theta)$ basierend auf DSC-Messung Nr. 14, Tab. A2

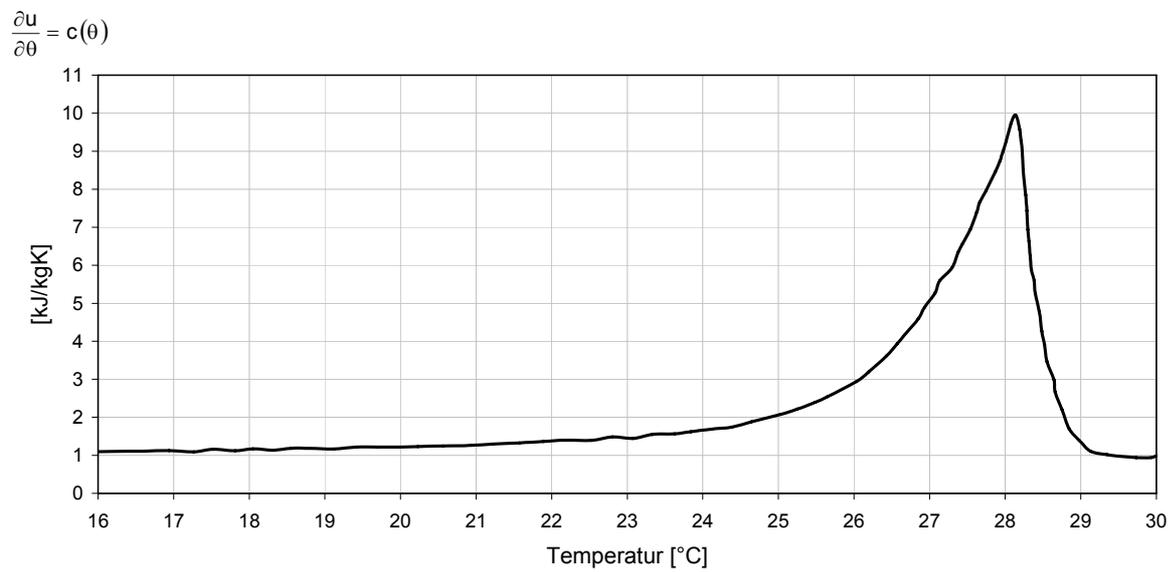


Abb. A2-15: $c(\theta)$ basierend auf DSC-Messung Nr. 15, Tab. A2

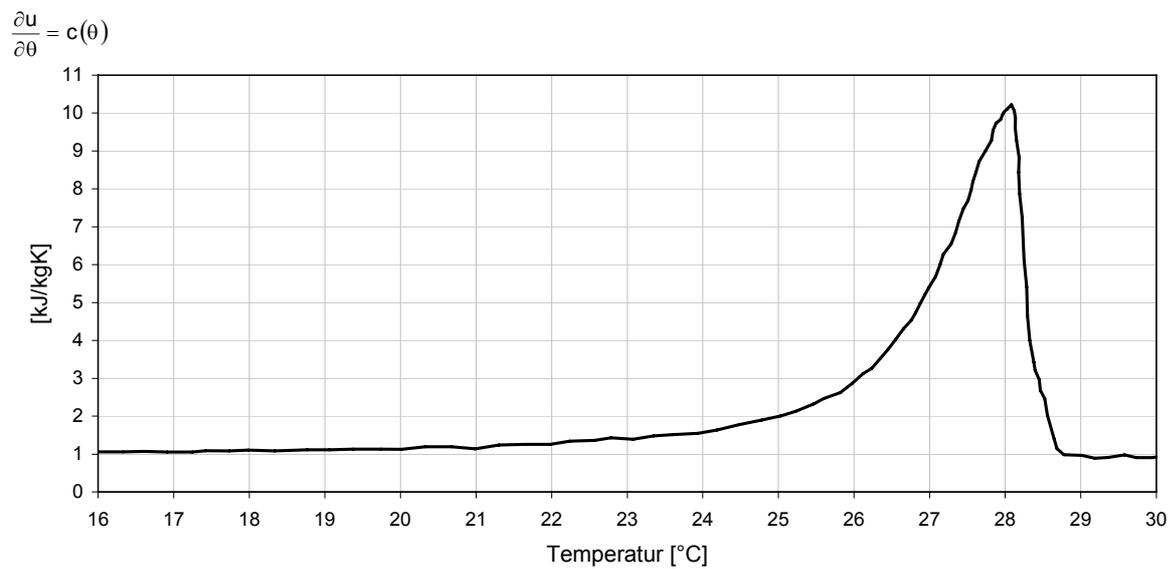


Abb. A2-16: $c(\theta)$ basierend auf DSC-Messung Nr. 16, Tab. A2

ANHANG 3

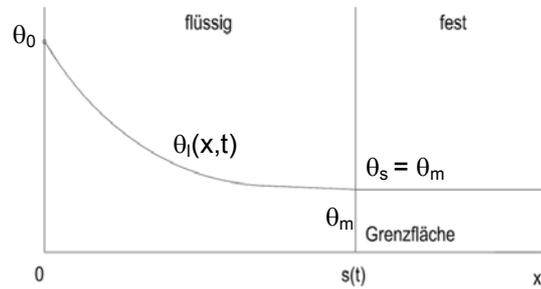
ANALYTISCHE LÖSUNG SCHMELZVORGANG 1. ORDNUNG:

Temperaturverteilung im flüssigen Zustand:

$$a_1 \cdot \frac{\partial^2 \theta_1(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\partial \theta_1(x,t)}{\partial t}$$

RB 1: $\theta_1(x,t) = \theta_0$ für $x = 0; t > 0$

RB 2: $\theta_s = \theta_m$ für $x = s(t); t > 0$



Wärmestrombilanz an der Phasengrenze:

RB 3: $-\lambda_1 \cdot \frac{\partial \theta_1(x,t)}{\partial x} = \rho \cdot l \cdot \frac{ds(t)}{dt}$ für $x = s(t); t > 0$ $s(t)$: Ortsbeschreibung der Phasengrenze [m]

Anfangsbedingung für die Temperaturverteilung im Bauteil:

AB: $\theta_1(x,t) = \theta_m$ für $t = 0; x > 0$

Lösungsansatz: $\theta_1(x,t) = \theta_0 + B \cdot \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{a_1 \cdot t}} \right]$

\square in RB 1: $x = s(t); \theta_0 + B \cdot \operatorname{erf} \left[\frac{s(t)}{2\sqrt{a_1 \cdot t}} \right] = \theta_m$ mit: $k = \frac{s(t)}{2\sqrt{a_1 \cdot t}} \Rightarrow B = \frac{\theta_m - \theta_0}{\operatorname{erf}[k]}$

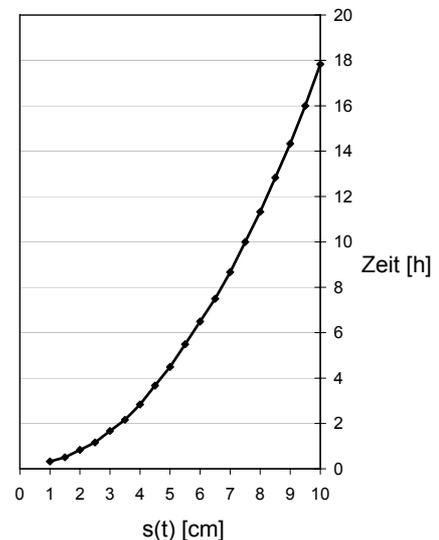
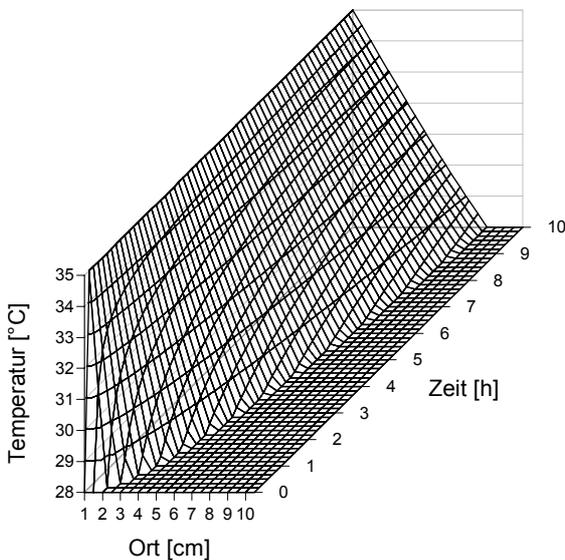
Koeffizient B in Lösungsansatz \square :

\square $\theta_1(x,t) = \theta_0 + \frac{\theta_m - \theta_0}{\operatorname{erf}[k]} \cdot \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{a_1 \cdot t}} \right]$

\square in RB 3: $-\lambda_1 \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta_0 + \frac{\theta_m - \theta_0}{\operatorname{erf}[k]} \cdot \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{a_1 \cdot t}} \right] \right) = \rho \cdot l \cdot \frac{\partial}{\partial t} (2k \cdot \sqrt{a_1 \cdot t})$

$x = s(t): -\lambda_1 \cdot \frac{\theta_m - \theta_0}{\operatorname{erf}[k]} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi} \sqrt{a_1 \cdot t}} \exp(-k^2) = \rho \cdot l \cdot k \cdot \frac{\sqrt{a_1 \cdot t}}{t} \Rightarrow \frac{c_1 \cdot (\theta_0 - \theta_m)}{l \cdot \sqrt{\pi}} = k \cdot \exp(k^2) \cdot \operatorname{erf}[k]$

Grafische Lösung für: $\theta_m = 28^\circ\text{C}$, $\theta_0 = 35^\circ\text{C}$, a_1 gemäß Kap. 3-3 (PCM-Putz)



ANALYTISCHE LÖSUNG ERSTARRUNGSVORGANG 1. ORDNUNG:

Temperaturverteilung im festen Zustand:

$$a_s \cdot \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial x^2} = \frac{\partial \theta_s}{\partial t}$$

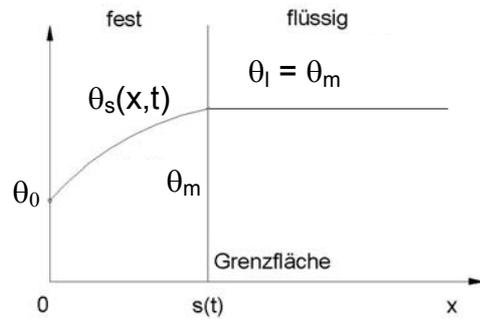
RB 1: $\theta_s(x, t) = \theta_m$ für $x = s(t); t > 0$

RB 2: $\theta_s(x, t) = \theta_0$ für $x = 0; t > 0$

Wärmestrombilanz an der Phasengrenze:

RB 3: $\lambda_s \cdot \frac{\partial \theta_s(x, t)}{\partial x} = \rho \cdot l \cdot \frac{ds(t)}{dt}$ für $x = s(t); t > 0$

$s(t)$: Ortsbeschreibung der Phasengrenze [m]



Anfangsbedingung für die Temperaturverteilung im Bauteil:

AB: $\theta_s(x, t) = \theta_m$ für $t = 0; x > 0$

Lösungsansatz: $\theta_s(x, t) = \theta_0 + A \cdot \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{a_s \cdot t}} \right]$

[1] in RB 1: $x = s(t); \theta_0 + A \cdot \operatorname{erf} \left[\frac{s(t)}{2\sqrt{a_s \cdot t}} \right] = \theta_m$ mit: $k = \frac{s(t)}{2\sqrt{a_s \cdot t}} \Rightarrow A = \frac{\theta_m - \theta_0}{\operatorname{erf}[k]}$

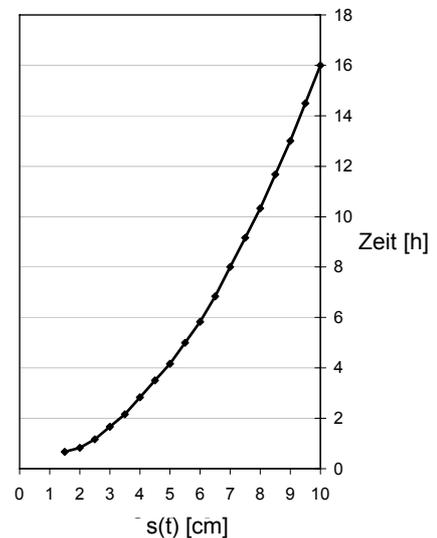
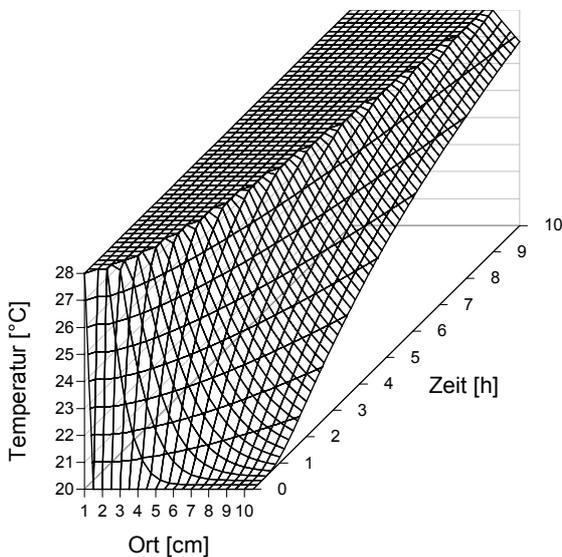
Koeffizient A in Lösungsansatz [1] :

[2] $\theta_s(x, t) = \theta_0 + \frac{\theta_m - \theta_0}{\operatorname{erf}[k]} \cdot \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{a_s \cdot t}} \right]$

[2] in RB 3: $\lambda_s \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta_0 + \frac{\theta_m - \theta_0}{\operatorname{erf}[k]} \cdot \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{a_s \cdot t}} \right] \right) = \rho \cdot l \cdot \frac{\partial}{\partial t} (2k \cdot \sqrt{a_s \cdot t})$

$x = s(t): \lambda_s \cdot \frac{\theta_m - \theta_0}{\operatorname{erf}[k]} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi a_s \cdot t}} \exp(-k^2) = \rho \cdot l \cdot k \cdot \frac{\sqrt{a_s \cdot t}}{t} \Rightarrow \frac{c_s \cdot (\theta_m - \theta_0)}{l \cdot \sqrt{\pi}} = k \cdot \exp(k^2) \cdot \operatorname{erf}[k]$

Grafische Lösung für: $\theta_m = 28^\circ\text{C}$, $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$, a_1 gemäß Kap. 3-3 (PCM-Putz)



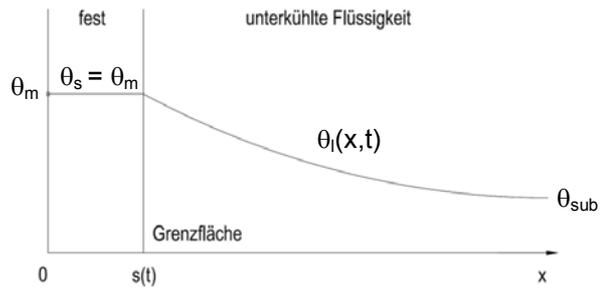
ANALYTISCHE LÖSUNG UNTERKÜHLTES ERSTARREN 1. ORDNUNG:

Temperaturverteilung im flüssigen Zustand:

$$a_1 \cdot \frac{\partial^2 \theta_1(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\partial \theta_1(x,t)}{\partial t}$$

RB 1: $\theta_1(x,t) = \theta_m$ für $x = s(t); t > 0$

RB 2: $\theta_1(x,t) \rightarrow \theta_{sub}$ für $x \rightarrow \infty; t > 0$



Wärmestrombilanz an der Phasengrenze:

RB 3: $-\lambda_1 \cdot \frac{\partial \theta_1(x,t)}{\partial x} = \rho \cdot l \cdot \frac{ds(t)}{dt}$ für $x = s(t); t > 0$; $s(t)$: Ortsbeschreibung der Phasengrenze [m]

Anfangsbedingung für die Temperaturverteilung im Bauteil:

AB: $\theta_1(x,t) = \theta_{sub}$ für $t = 0; x > 0$

Lösungsansatz: $\theta_1(x,t) = \theta_{sub} + B \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2\sqrt{a_1 \cdot t}} \right]$

θ_1 in RB 1: $x = s(t); \theta_{sub} + B \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{s(t)}{2\sqrt{a_1 \cdot t}} \right] = \theta_m$ mit: $k = \frac{s(t)}{2\sqrt{a_1 \cdot t}} \Rightarrow B = \frac{\theta_m - \theta_{sub}}{\operatorname{erfc}[k]}$

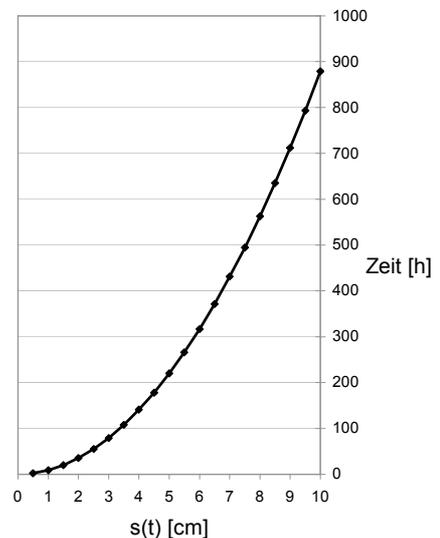
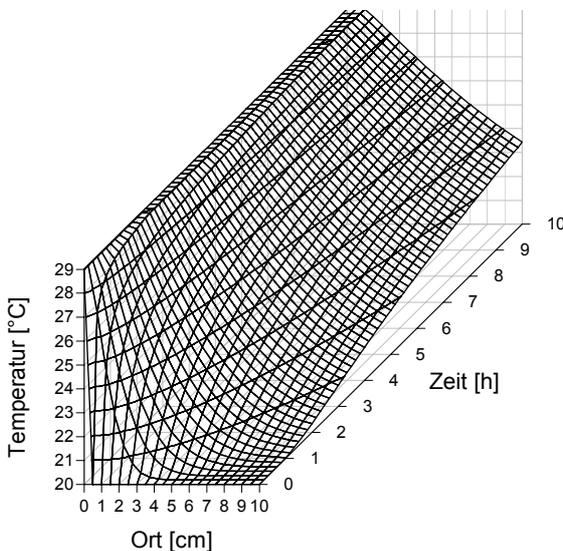
Koeffizient B in Lösungsansatz θ_1 :

$\theta_1(x,t) = \theta_{sub} + \frac{\theta_m - \theta_{sub}}{\operatorname{erfc}[k]} \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2\sqrt{a_1 \cdot t}} \right]$

θ_1 in RB 3: $-\lambda_1 \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta_{sub} + \frac{\theta_m - \theta_{sub}}{\operatorname{erfc}[k]} \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2\sqrt{a_1 \cdot t}} \right] \right) = \rho \cdot l \cdot \frac{\partial}{\partial t} (2k \cdot \sqrt{a_1 \cdot t})$

$x = s(t): \lambda_1 \cdot \frac{\theta_m - \theta_{sub}}{\operatorname{erfc}[k]} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot a_1 \cdot t}} \exp(-k^2) = \rho \cdot l \cdot k \cdot \frac{\sqrt{a_1 \cdot t}}{t} \Rightarrow \frac{c_1 \cdot (\theta_m - \theta_{sub})}{l \cdot \sqrt{\pi}} = k \cdot \exp(k^2) \cdot \operatorname{erfc}[k]$

Grafische Lösung für: $\theta_m = 29^\circ\text{C}$, $\theta_{sub} = 20^\circ\text{C}$, a_1 gemäß Tab. 3-4 (Salzhydrat)



ANHANG 4

Numerische Behandlung der Unterkühlung

Die numerische Behandlung der Unterkühlung basiert auf dem in Kap. 4.2.1 und Kap. 4.2.2 vorgestellten Finite-Differenzen-Verfahren. Bei einer unterkühlten Phasenumwandlung kann das Enthalpieniveau des PCM nicht mehr nur anhand der Temperatur des Materials bestimmt werden, sondern es muss zusätzlich der zeitliche Temperaturverlauf vor dem betrachteten Zeitpunkt bekannt sein. Diese Historie bestimmt den Zustand des PCM und den Grad der Umwandlung fest \leftrightarrow flüssig.

Bei der numerischen Umsetzung eines unterkühlten Phasenübergangs wird zu diesem Zwecke der Schmelzgrad h eingeführt. Der Schmelzgrad h gibt an, wie viel Latentwärme umgesetzt wurde, bzw. wieviel des Stoffes geschmolzen ist. Der Schmelzgrad variiert zwischen $h = 0\%$ (komplett fest) und $h = 100\%$ (komplett flüssig). Der Schmelzgrad wird für jeden, ein bestimmtes Volumen repräsentierenden Temperaturknoten separat betrachtet und immer dann neu berechnet, wenn der Temperaturverlauf ein Extremum aufweist. Diese mathematischen Minima und Maxima werden im Folgenden als Wendepunkte bezeichnet, da sie die Umkehr von einem Abkühlprozess zum Erwärmungsprozess bzw. umgekehrt darstellen. Am Wendepunkt wird über die Funktion der temperaturabhängigen Wärmekapazität $c_{\text{latent}}(\theta)$ integriert, wobei die Integrationsgrenzen entsprechend der gewählten Funktion den (Teil-)Bereich zwischen Schmelz- und Erstarrungspunkt umfassen, der von dem vorherigen Wendepunkt ($\theta_{\text{WP_old}}$) bis zum betrachteten Wendepunkt (θ_{WP}) durchlaufen wurde. Dieser neu berechnete Wert für den Schmelzgrad (h_{new}) wird im Falle des Erwärmungsvorgangs zu dem bisherigen Wert der Zustandsvariablen (h_{old}) addiert und im Falle des Abkühlvorgangs subtrahiert. Aus dem so berechneten aktuellen Wert für den Schmelzvorgang wird ein Faktor (fac) gebildet, der es erlaubt, bei der Phasenumwandlung zwischen dem betrachteten Zeitpunkt und dem nachfolgenden Wendepunkt genau die gesamte noch verfügbare Latentwärme umzusetzen, falls die maßgebliche Temperatur erreicht wird. Die maßgebliche Temperatur ist im Falle des Schmelzens die Temperatur θ_2 , beim nicht unterkühlten Erstarrungsvorgang ist es die Temperatur θ_1 und beim unterkühlten Erstarren die Temperatur θ_{1_sub} .

Aufwärmvorgang und nicht unterkühlte Erstarrung:

$$\theta_1 < \theta < \theta_2: \quad c_{1_latent}(\theta) = \text{fac} \cdot \exp(a_1 + b_1 \cdot \theta)$$

Unterkühlte Erstarrung:

$$\theta_{1_sub} < \theta < \theta_{2_sub}: \quad c_{2_latent}(\theta) = \text{fac} \cdot \exp(a_2 + b_2 \cdot \theta)$$

Berechnung des Faktors zur Berücksichtigung des Enthalpieniveaus bei unterkühltem Phasenübergang:

$$\text{Unterer Wendepunkt:} \quad \text{fac} = \frac{l \cdot (1 - h)}{\int_{\theta_{\text{WP}}}^{\theta_2} c_{1_latent}(\theta) d\theta}$$

$$\text{Oberer Wendepunkt:} \quad \text{fac} = \frac{l \cdot h}{\int_{\theta_1}^{\theta_{\text{WP}}} c_{1_latent}(\theta) d\theta} \quad \text{bzw.}$$

$$\text{Im Falle von Unterkühlung:} \quad \text{fac} = \frac{l \cdot h}{\int_{\theta_2}^{\theta_{\text{WP}}} c_{2_latent}(\theta) d\theta}$$

ANHANG 4

Dieser Faktor wird an jedem Wendepunkt berechnet und er reduziert bzw. erhöht bis zum Erreichen des nächsten Wendepunktes die temperaturabhängige Wärmekapazität (Gl. 3-23).

Damit bei der Integration der temperaturabhängigen Wärmekapazität die entsprechende Funktion und die maßgeblichen Integrationsgrenzen gewählt werden können, müssen verschiedene Fallunterscheidungen getroffen werden. Diese Fälle repräsentieren das Verhalten eines PCM mit Unterkühlungseffekt unter Annahme folgender Vereinfachungen:

- Der Aufwärmvorgang lässt sich mit der Funktion $c_{1_latent}(\theta)$ darstellen und ist reproduzierbar.
- Beginnt der Erstarrungsvorgang bevor alles PCM geschmolzen ist, findet keine Unterkühlung statt, da noch Kristallisationskeime vorhanden sind.
- Beginnt der Abkühlvorgang oberhalb der nicht unterkühlten Erstarrungstemperatur (θ_2), kühlt das PCM ohne Verfestigung bis zur unterkühlten Erstarrungstemperatur ab (θ_{2_sub}). Beim weiteren Abkühlen lässt sich der Erstarrungsvorgang mit der Funktion $c_{2_latent}(\theta)$ darstellen.
- Beginnt der Aufwärmvorgang während der Phase des unterkühlten Erstarrens bei $\theta < \theta_1$, bleibt der aktuelle Zustand des PCM erhalten, bis die Temperatur θ_1 erreicht ist.
- Die Temperatur θ_{2_sub} liegt zwischen θ_1 und θ_2 .

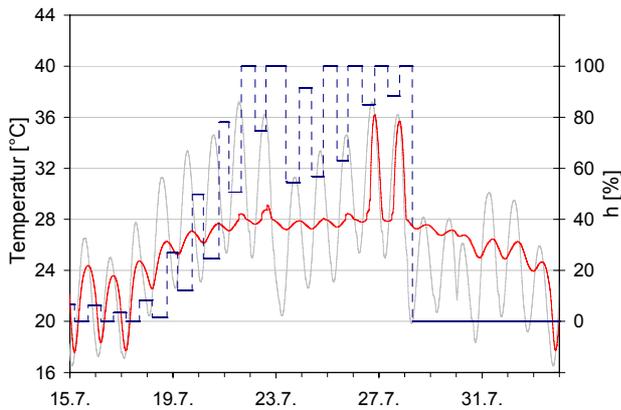


Abb. A4-1: ohne Unterkühlung

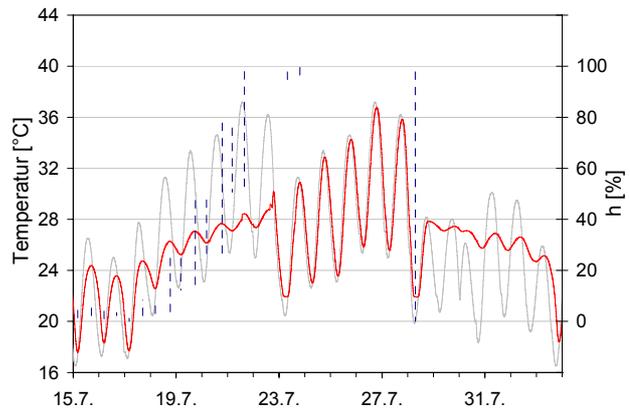


Abb. A4-2: mit Unterkühlung

Rot: Oberflächentemperatur eines PCM 172, $d = 3 \text{ cm}$

Grau: Lufttemperatur, $h = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$

Blau gestrichelt: Schmelzgrad h für oberflächennahes Volumenelement

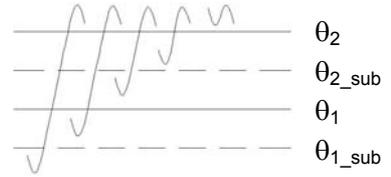
ANHANG 4

Fallunterscheidungen am oberen Wendepunkt:

1. $\theta_{WP} > \theta_2$

Das PCM ist komplett flüssig. Die Erstarrung kann erst bei der Temperatur θ_{2_sub} beginnen. Die temperaturabhängige Wärmekapazität im nächsten Zeitschritt folgt der Funktion $c_{2_latent}(\theta)$.

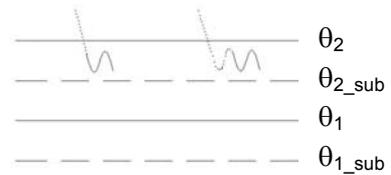
$$fac = 1 \qquad h = 100\%$$



2. $\theta_{WP_old} > \theta_1$ und $\theta_{WP} < \theta_2$

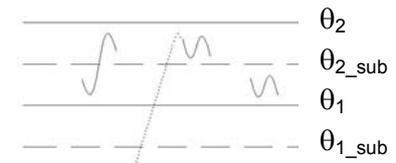
a, Das PCM ist komplett flüssig und befindet sich im unterkühlten Zustand. Die temperaturabhängige Wärmekapazität im nächsten Zeitschritt folgt der Funktion $c_{2_latent}(\theta)$.

$$fac = 1 \qquad h = 100\%$$



b, Das PCM ist nicht komplett flüssig. Die temperaturabhängige Wärmekapazität im nächsten Zeitschritt folgt der Funktion $c_{1_latent}(\theta)$.

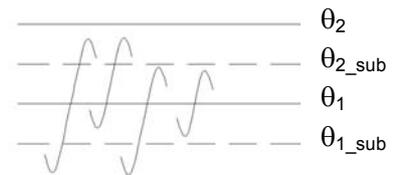
$$fac = \frac{l \cdot h}{\int_{\theta_1}^{\theta_{WP}} c_{1_latent}(\theta) d\theta} \qquad h_new = \left(\int_{\theta_{WP_old}}^{\theta_{WP}} c_{1_latent}(\theta) d\theta \right) / l \quad [\%]$$



3. $\theta_{WP_old} < \theta_1$ und $\theta_1 < \theta_{WP} < \theta_2$

Das PCM ist nicht komplett flüssig. Die temperaturabhängige Wärmekapazität im nächsten Zeitschritt folgt der Funktion $c_{1_latent}(\theta)$.

$$fac = \frac{l \cdot h}{\int_{\theta_1}^{\theta_{WP}} c_{1_latent}(\theta) d\theta} \qquad h_new = \left(\int_{\theta_1}^{\theta_{WP}} c_{1_latent}(\theta) d\theta \right) / l \quad [\%]$$



4. $\theta_{WP} < \theta_1$

a, Das PCM ist komplett fest.

$$fac = 0 \qquad h = 0$$



b, Das PCM befand sich beim vorherigen Abkühlen im unterkühlten Zustand und ist nicht komplett erstarrt.

$$fac = 0 \qquad h = 0$$



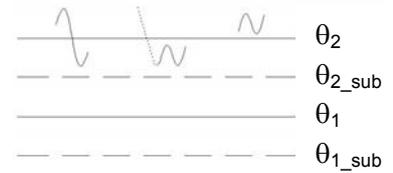
ANHANG 4

Fallunterscheidungen am unteren Wendepunkt:

5. $\theta_{WP} > \theta_{2_sub}$

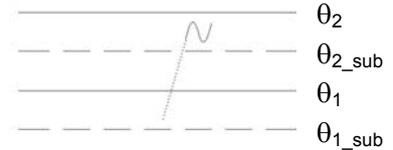
a, Das PCM ist komplett flüssig und befindet sich im unterkühlten Zustand.

$$fac = 0 \quad h = 100\%$$



b, Das PCM ist nicht komplett flüssig. Die temperaturabhängige Wärmekapazität im nächsten Zeitschritt folgt der Funktion $c_{1_latent}(\theta)$.

$$fac = \frac{l \cdot (1-h)}{\int_{\theta_{WP}}^{\theta_2} c_{1_latent}(\theta) d\theta} \quad h_new = \left(\int_{\theta_{WP}}^{\theta_{WP_old}} c_{1_latent}(\theta) d\theta \right) / l \quad [\%]$$



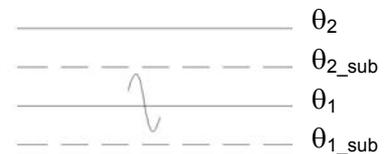
6. $\theta_{WP_old} < \theta_{2_sub}$ und $\theta_1 < \theta_{WP} > \theta_{2_sub}$

$$fac = \frac{l \cdot (1-h)}{\int_{\theta_{WP}}^{\theta_2} c_{1_latent}(\theta) d\theta} \quad h_new = \left(\int_{\theta_{WP}}^{\theta_{WP_old}} c_{1_latent}(\theta) d\theta \right) / l \quad [\%]$$



7. $\theta_1 < \theta_{WP_old} < \theta_{2_sub}$ und $\theta_{1_sub} < \theta_{WP} < \theta_1$

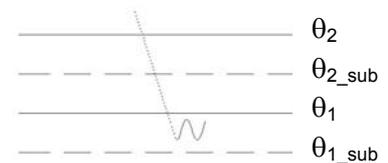
$$fac = 1 \quad h = 0$$



8. $\theta_{1_sub} < \theta_{WP_old} < \theta_1$ und $\theta_{WP} > \theta_{1_sub}$

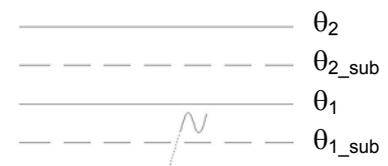
a, Das PCM befand sich vor Beginn des Abkühlvorgangs im unterkühlten Zustand.

$$fac = \frac{L_{ges} - h}{\int_{\theta_1}^{\theta_2} c_{1_latent}(\theta) d\theta} \quad h_new = \left(\int_{\theta_{WP}}^{\theta_{WP_old}} c_{2_latent}(\theta) d\theta \right) / l \quad [\%]$$



b, Das PCM war vor Beginn des Abkühlvorgangs komplett fest.

$$fac = 1 \quad h = 0$$

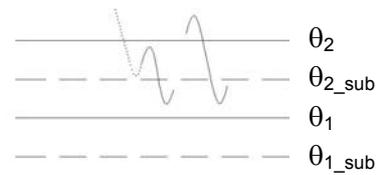


ANHANG 4

9. $\theta_{WP_old} > \theta_{2_sub}$ und $\theta_1 < \theta_{WP} < \theta_{2_sub}$

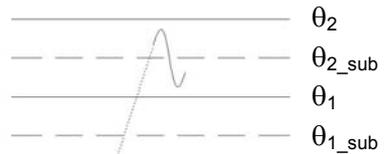
a, Das PCM befand sich vor Beginn des Abkühlvorgangs im unter kühlen Zustand.

$$fac = \frac{L_{ges} - h}{\int_{\theta_{WP}}^{\theta_2} c_{1_latent}(\theta) d\theta} \quad h_{new} = \left(\int_{\theta_{WP}}^{\theta_{2_sub}} c_{2_latent}(\theta) d\theta \right) / I [\%]$$



b, Das PCM war vor Beginn des Abkühlvorgangs nicht komplett flüssig.

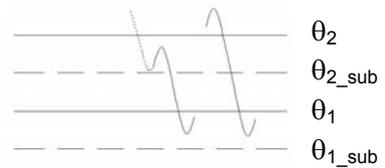
$$fac = \frac{L_{ges} - h}{\int_{\theta_{WP}}^{\theta_2} c_{1_latent}(\theta) d\theta} \quad h_{new} = \left(\int_{\theta_{WP}}^{\theta_{WP_old}} c_{1_latent}(\theta) d\theta \right) / I [\%]$$



10. $\theta_{WP_old} > \theta_{2_sub}$ und $\theta_{1_sub} < \theta_{WP} < \theta_1$

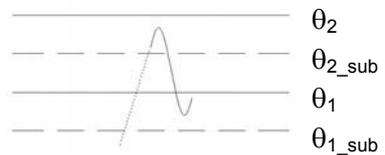
a, Das PCM befand sich vor Beginn des Abkühlvorgangs im unter kühlen Zustand.

$$fac = \frac{L_{ges} - h}{\int_{\theta_1}^{\theta_2} c_{1_latent}(\theta) d\theta} \quad h_{new} = \left(\int_{\theta_{WP}}^{\theta_{2_sub}} c_{2_latent}(\theta) d\theta \right) / I [\%]$$



b, Das PCM war vor Beginn des Abkühlvorgangs nicht komplett flüssig.

$$fac = \frac{L_{ges} - h}{\int_{\theta_1}^{\theta_2} c_{1_latent}(\theta) d\theta} \quad h_{new} = \left(\int_{\theta_1}^{\theta_{WP_old}} c_{1_latent}(\theta) d\theta \right) / I [\%]$$

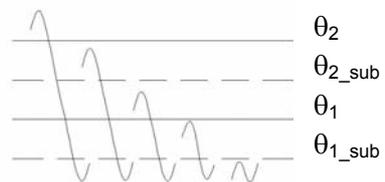


11. $\theta_{WP} < \theta_{1_sub}$

Das PCM ist komplett fest.

$$fac = 1$$

$$h = 0$$




```

C*****
C WENDEPUNKTE
C*****
C HAUPTPROGRAMM
C*****
dx = dicke/n
DO 100 i=1, ndt !Schleife ueber alle Zeitschritte
  Call ReadData
  DO 110 j=1,(FELD) !Schleife ueber alle Temperaturknoten
    Berechnung der Temperaturen TnS1
    Temperaturabhängige Waermekapazitaet entsprechend dem Zustandsparameter
    Beim Erwaermen ist k=1, beim nicht unterkuhlten Erstarren ist k ebenfalls 1
    Beim unterkuhlten Erstarren ist k=0
    if (k(i).eq.1) then
      Call getheatcap1(TnS(i),fac(i))
    Else
      Call getheatcap2(TnS(i),fac(i))
    end if
    Hier werden die Subroutinen zur Berechnung der Temperaturen aufgerufen
    if (k(i).eq.1) then
      Call CalcLambda1(TnS(i),h(i),Lambda(i))
    Else
      Call CalcLambda2(TnS(i),h(i),Lambda(i))
    end if
    if (j.eq.1) then
      Call getTempOF1(TnS(1),TnS(2),TnS1(1),Lambda(i))
    else if (j.eq.FELD) then
      Call getTempOF2(TnS(FELD),TnS(FELD-1),TnS1(FELD),Lambda(i))
    else
      Call getTemp(TnS(j-1),TnS(j),TnS(j+1),TnS1(j),Lambda(i))
    end if
  C*****
C WENDEPUNKTE
C*****
IF (TnSold(i).Le.TnS(i).and.TnS1(i).gt.TnS1(i)) THEN !Oberer Wendepunkt
  INTEGRATE 1
  Berechnung der umgesetzten Latentwaermemenge zwischen TWPold und TWP in
  INTEGRATE 1
  Berechnung der Zustandsvariablen h und des Faktors fac in INTEGRATE 1
  write(*,*) MAIN - oberer Wendepunkt
  write(*,*) TWPold = , TWPold
  CALL integrate1(TnS(i),TnS1(i),fac(i),h(i),hold(i),hnew(i),
  & TWPold(i),TWP(i),k(i))
  write(*,*) TWP = , TWP
  TWPold(i)=TWP(i)
  hold(i)=h(i)
  C Hier wird der Zustandsparameter k gesetzt:
  C k=0, Unterkuehlung findet statt, c(T) im Bereich TMELT2 und TSOL12
  C k=1, keine Unterkuehlung, c(T) im Bereich TMELT und TSOL1
  C Wendepunkt im Unterkuehlungsbereich zwischen TSOL1 und TSOL12:
  if (TnS(i).GT.TMELT.AND.TnS(i).LE.TSOL1) then
  PCM liegt rein fluessig vor, es findet Unterkuehlung statt:
  if (h(i).EQ.Lges) then
    k(i)=0
  else if (h(i).NE.Lges) then
    k(i)=1
  end if
  Wendepunkt liegt oberhalb von TSOL1, PCM ist komplett fluessig:
  beim Abkuehlen findet Unterkuehlung statt:
  else if (TnS(i).GT.TSOL1) then
    k(i)=0
  Wendepunkt liegt unterhalb von TMELT
  else if (TnS(i).LE.TMELT) then
    PCM ist komplett fest:
    if (h(i).EQ.0) then
      k(i)=1
    else if (h(i).NE.0) then
      k(i)=0
  end if
  PCM befindet sich noch im Unterkuehlungsbereich zwischen TMELT2 und TMELT
  else if (h(i).NE.0) then
    k(i)=0
  end if
  end if
C*****
C*****
C ELSE IF (TnSold(j).ge.TnS(j).and.TnS1(j).lt.TnS1(j)) THEN !Unterer Wendepunkt
  Test ob der Wendepunkt nach einer Phase der Unterkuehlung (k=0)
  oder nach einer nicht unterkuehlten Erstarungsphase (k=1) aufriff
  INTEGRATE2 wird bei der unterkuehlten Erstarungsphase aufgerufen:
  if (k(i).eq.0) then
    CALL integrate2(TnS(i),TnS1(i),fac(i),h(i),hold(i),hnew(i),
    & TWPold(i),TWP(i),k(i))
  else
    TWPold(i)=TWP(i)
    hold(i)=h(i)
  C INTEGRATE1 wird bei der nicht unterkuehlten Erstarungsphase aufgerufen
  CALL integrate1(TnS(i),TnS1(i),fac(i),h(i),hold(i),hnew(i),
  & TWPold(i),TWP(i),k(i))
  write(*,*) TWP = , TWP
  TWPold(i)=TWP(i)
  hold(i)=h(i)
  end if
  END IF
  *****
  else
  continue
  end if
  110 CONTINUE
  C Ergebnisse werden in die Ausgabe-Dateien geschrieben
  VERGL=(1.0*1)/u-(1/u)
  IF (VERGL.eq.0) THEN
  CALL WriteData(FELD,L,TnS1,h,fac,k,Lambda)
  END IF
  DO 120 j=1,FELD
  TnSold(j)=TnS(j)
  TnS1(j)=TnS1(j)
  120 CONTINUE
  100 CONTINUE
C*****
C*****

```

```

C *****
C Dateien schließen
CLOSE (20,STATUS='KEEP')
CLOSE (30,STATUS='KEEP')
CLOSE (31,STATUS='KEEP')
CLOSE (32,STATUS='KEEP')
CLOSE (33,STATUS='KEEP')
CLOSE (34,STATUS='KEEP')
CLOSE (35,STATUS='KEEP')
CLOSE (36,STATUS='KEEP')
CLOSE (37,STATUS='KEEP')
CLOSE (38,STATUS='KEEP')
CLOSE (39,STATUS='KEEP')
CLOSE (41,STATUS='KEEP')

write('*)' END

END PROGRAM explizitesModell
C *****
C Berechnung der ersten oberflächennahen Temperatur
SUBROUTINE getTempOF1(TnS,TnSn,TnS1,Lambda)
COMMON /TEMP/Ts,Ti
COMMON /d/dicke,dx,dt,ndt
COMMON /mat/lambdasol, lambdapcm, lambdalIQ, c, rho, hc1,
$ TSOLI,TMELT
COMMON /z/i,u,j
INTEGER i,j,u
REAL :: lambdasol, lambdapcm, lambdalIQ, c, rho, Lambda
G1=TnS*(rho*dx/2*c*dt-hc1-Lambda/dx)
G2=TnSn*Lambda/dx
G3=hc1*Ts
TnS1=(G1+G2+G3)/(rho*dx/2*c*dt)
END Subroutine getTempOF1
C *****
C Berechnung der zweiten oberflächennahen Temperatur (adiabatischer Abschluss)
SUBROUTINE getTempOF2(TnS,Tnsv,TnS1,Lambda)
COMMON /TEMP/Ts,Ti
COMMON /d/dicke,dx,dt,ndt
COMMON /mat/lambdasol, lambdapcm, lambdalIQ, c, rho, hc1,
$ TSOLI,TMELT
COMMON /z/i,u,j
INTEGER i,j,u
REAL :: lambdasol, lambdapcm, lambdalIQ, c, rho, Lambda
G1=TnS*(rho*dx/2*c*dt-Lambda/dx)
G2=Tnsv*(Lambda/dx)
G3=0
TnS1=(G1+G2+G3)/(rho*dx/2*c*dt)
END Subroutine getTempOF2
C *****
C Berechnung der temperaturabhangigen Waermeleitfahigkeit - nicht unterkuhler Bereich
SUBROUTINE getheatcap1(T,fac)
COMMON /TEMP/Ts,Ti
COMMON /d/dicke,dx,dt,ndt
COMMON /mat/lambdasol, lambdapcm, lambdalIQ, c, rho, hc1,
$ TSOLI,TMELT
COMMON /z/i,u,j
REAL :: T, TSOLI, TMELT, h, hold, hnew, fac
INTEGER i,j,u
double precision a1,b1,a2,b2
IF (T.LT. TMELT) THEN
c=1000
ELSE IF (T.GE. TMELT.AND.T.LE. TSOLI) THEN
c=fac*EXP(a2+b2*(T)-1000)
ELSE IF (T.GT. TSOLI) THEN
c=1000
END IF
END SUBROUTINE getheatcap1
C *****
C Berechnung der temperaturabhangigen Waermeleitfahigkeit - unterkuhler Bereich
SUBROUTINE getheatcap2(T,fac)
COMMON /TEMP/Ts,Ti
COMMON /d/dicke,dx,dt,ndt
COMMON /mat/lambdasol, lambdapcm, lambdalIQ, c, rho, hc1,
$ TSOLI,TMELT
COMMON /z/i,u,j
COMMON /sub/Lges,sub
COMMON /c/a1,a2,b1,b2
REAL :: lambdasol, lambdapcm, lambdalIQ, c, rho
REAL :: T, TSOLI, TMELT, TMELT2,TSOLI2,sub
real :: h, hold, hnew
REAL :: Lges
INTEGER i,j,u
double precision a1,b1,a2,b2
TMELT2=TMELT-sub
TSOLI2=TSOLI-sub
IF (T.LT. TMELT2) THEN
c=1000
ELSE IF (T.GE. TMELT2.AND.T.LE. TSOLI2) THEN
c=fac*EXP(a2+b2*(T))+1000
ELSE IF (T.GT. TSOLI2) THEN
c=1000
END IF
END SUBROUTINE GetHeatCap2
C *****
C INTEGRATE 1
C Berechnung der Zustandsvariablen h und des Faktors fac
subroutine integrate1(TnS,TnS1,fac,h,hold,hnew,TWPold,TWP,k)
COMMON /TEMP/Ts,Ti
COMMON /d/dicke,dx,dt,ndt
COMMON /mat/lambdasol, lambdapcm, lambdalIQ, c, rho, hc1,
$ TSOLI,TMELT
COMMON /z/i,u,j
COMMON /sub/Lges,sub
COMMON /c/a1,a2,b1,b2
INTEGER i,j,u,k,FELDL
double precision a1,b1,a2,b2,a
REAL :: lambdasol, lambdapcm, lambdalIQ, c, rho, fac, Lges, sub
REAL :: h, hold, hnew, TMELT, TSOLI, TMELT2, TSOLI2
REAL :: TWPold, TWP
TWP=TnS
integrate 1 wird nach Aufschmelzvorgang bzw.
nach dem Erstarungsvorgang aufgerufen
C *****

```


ANHANG 5

Q_{eff} bei unterschiedlichen Werten für Wärmeleitfähigkeit λ

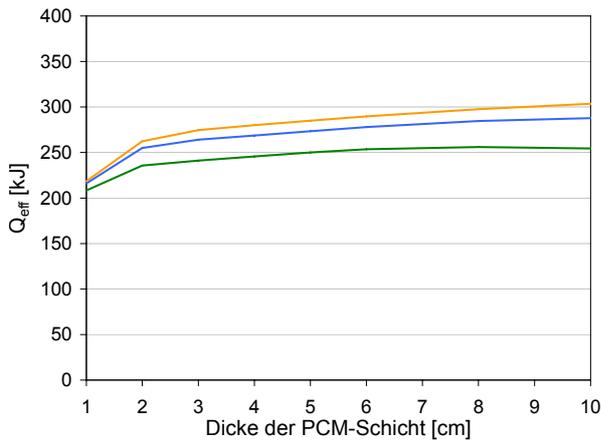


Abb. A5-1: Q_{eff} eines PCM 25

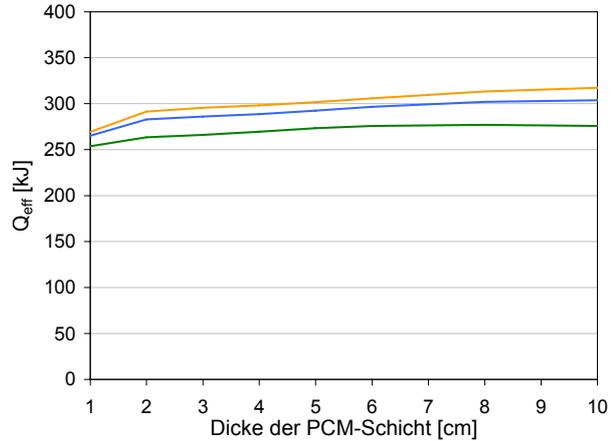


Abb. A5-2: Q_{eff} eines PCM 50

Grün: λ = 0.21 W/mK, Blau: λ = 0.42 W/mK, Orange: λ = 0.63 W/mK
 Lufttemperatur: θ_{RL} = 22.5°C + 2.5 K * sin(2π/24h*t)

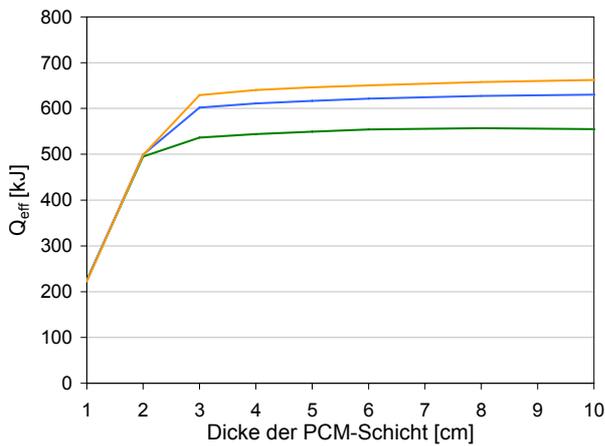


Abb. A5-3: Q_{eff} eines PCM 25

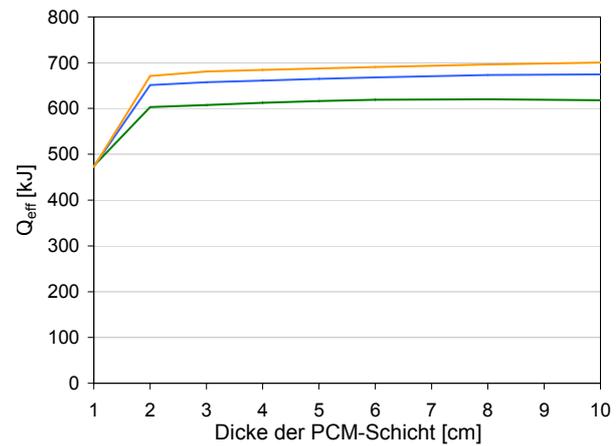


Abb. A5-4: Q_{eff} eines PCM 50

Grün: λ = 0.21 W/mK, Blau: λ = 0.42 W/mK, Orange: λ = 0.63 W/mK
 Lufttemperatur: θ_{RL} = 22.5°C + 5.0 K * sin(2π/24h*t)

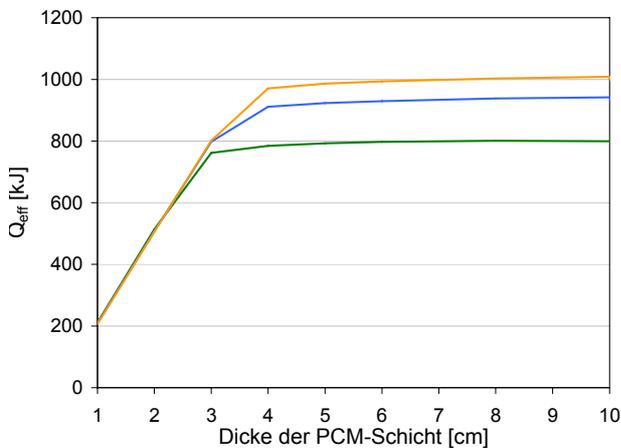


Abb. A5-5: Q_{eff} eines PCM 25

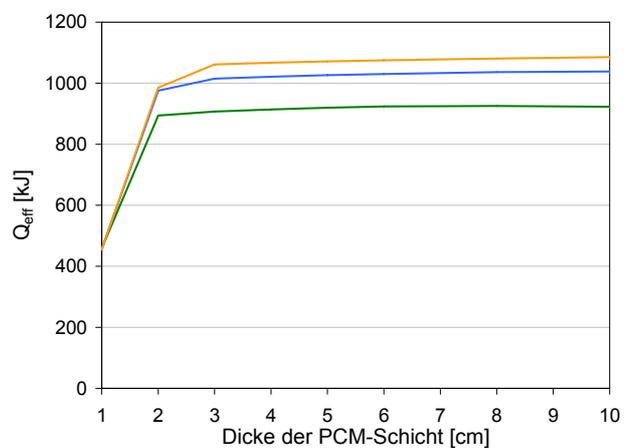


Abb. A5-6: Q_{eff} eines PCM 50

Grün: λ = 0.21 W/mK, Blau: λ = 0.42 W/mK, Orange: λ = 0.63 W/mK
 Lufttemperatur: θ_{RL} = 22.5°C + 7.5 K * sin(2π/24h*t)

ANHANG 6

Variation der Wärmeleitfähigkeit λ im Phasenübergangsbereich

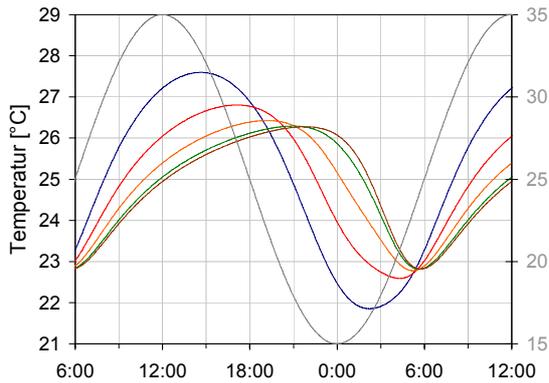


Abb. A6-1: Temperaturprofil eines PCM 172, $\theta_2 = 29^\circ\text{C}$ mit $\lambda = 0.55 \text{ W/mK} = \text{konst.}$

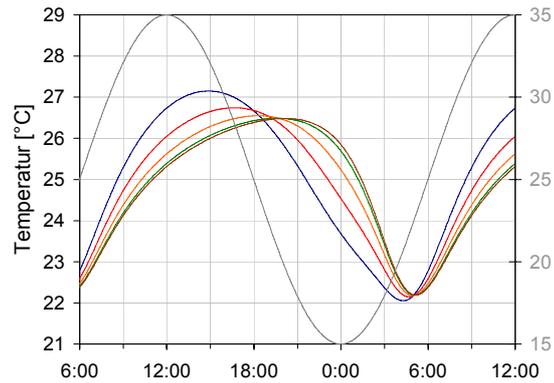


Abb. A6-2: Temperaturprofil eines PCM 172, $\theta_2 = 29^\circ\text{C}$ mit $\lambda = 1.1 \text{ W/mK} = \text{konst.}$

Blau: Oberflächentemperatur, Rot: $0.25 * d$, Orange: $0.5 * d$, Grün: $0.75 * d$, Braun: d ; $d = 6 \text{ cm}$
 Lufttemperatur (grau – Sekundärachse): $\theta_{RL} = 25.0^\circ\text{C} + 10 \text{ K} * \sin(2\pi/24h*t)$

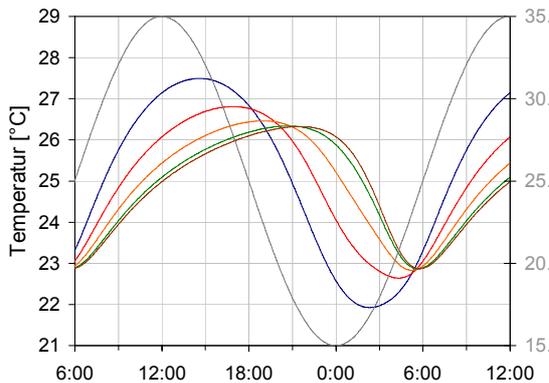


Abb. A6-3 a: Temperaturprofil eines PCM 172, $\theta_2 = 29^\circ\text{C}$ mit $\lambda_{\text{solid}} = 0.55 \text{ W/mK}$, $\lambda_{\text{liquid}} = 1.1 \text{ W/mK}$

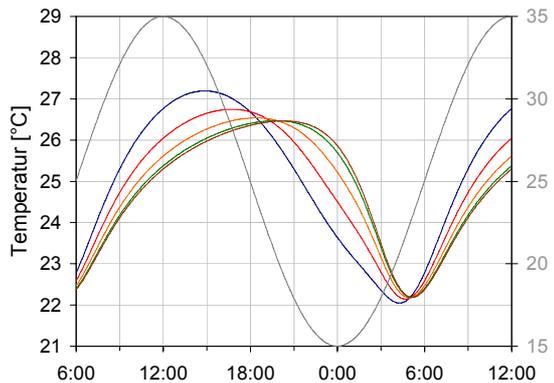


Abb. A6-4a: Temperaturprofil eines PCM 172, $\theta_2 = 29^\circ\text{C}$ mit $\lambda_{\text{solid}} = 1.1 \text{ W/mK}$, $\lambda_{\text{liquid}} = 0.55 \text{ W/mK}$

Blau: Oberflächentemperatur, Rot: $0.25 * d$, Orange: $0.5 * d$, Grün: $0.75 * d$, Braun: d ; $d = 6 \text{ cm}$
 Lufttemperatur (grau – Sekundärachse): $\theta_{RL} = 25.0^\circ\text{C} + 10 \text{ K} * \sin(2\pi/24h*t)$

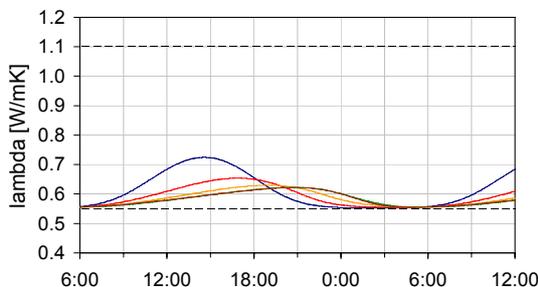


Abb. A6-3 b: Wärmeleitfähigkeit für Abb. A6-3 a mit $\lambda_{\text{solid}} = 0.55 \text{ W/mK}$, $\lambda_{\text{liquid}} = 1.1 \text{ W/mK}$

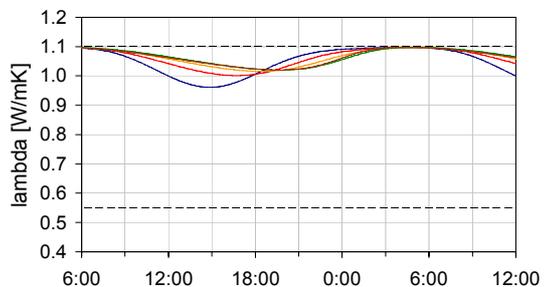


Abb. A6-4 b: Wärmeleitfähigkeit für Abb. A6-4 a mit $\lambda_{\text{solid}} = 1.1 \text{ W/mK}$, $\lambda_{\text{liquid}} = 0.55 \text{ W/mK}$

Blau: λ des OF-Knotens, Rot: λ an der Stelle $0.25 * d$, Orange: λ an der Stelle $0.5 * d$, Grün: λ an der Stelle $0.75 * d$, Braun: λ an der Stelle d ; $d = 6 \text{ cm}$

Variation der Wärmeleitfähigkeit λ im Phasenübergangsbereich

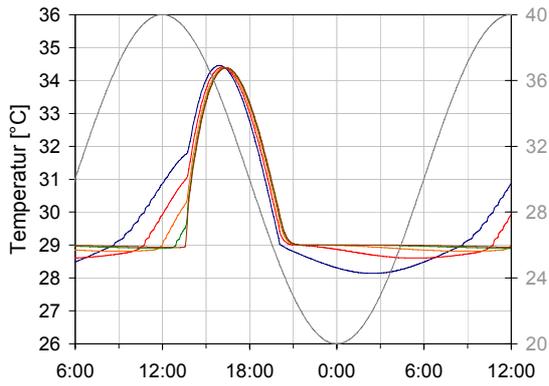


Abb. A6-5: Temperaturprofil eines PCM 172, $\theta_2 = 29^\circ\text{C}$ mit $\lambda = 0.55 \text{ W/mK} = \text{konst.}$

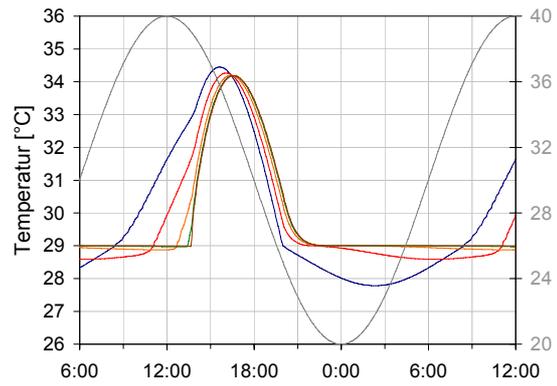


Abb. A6-6: Temperaturprofil eines PCM 172, $\theta_2 = 29^\circ\text{C}$ mit $\lambda = 1.1 \text{ W/mK} = \text{konst.}$

Blau: Oberflächentemperatur, Rot: $0.25 * d$, Orange: $0.5 * d$, Grün: $0.75 * d$, Braun: d ; $d = 6 \text{ cm}$
 Lufttemperatur (grau – Sekundärachse): $\theta_{RL} = 30.0^\circ\text{C} + 10 \text{ K} * \sin(2\pi/24h * t)$

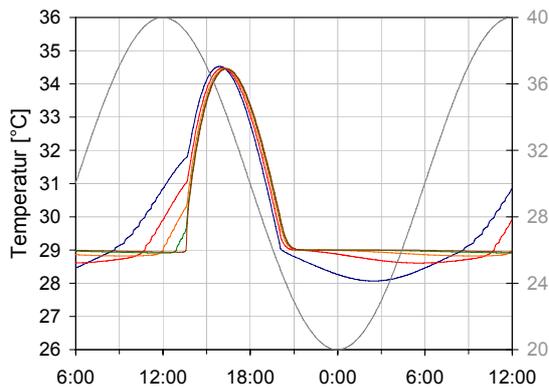


Abb. A6-7 a: Temperaturprofil eines PCM 172, $\theta_2 = 29^\circ\text{C}$ mit $\lambda_{\text{solid}} = 0.55 \text{ W/mK}$, $\lambda_{\text{liquid}} = 1.1 \text{ W/mK}$

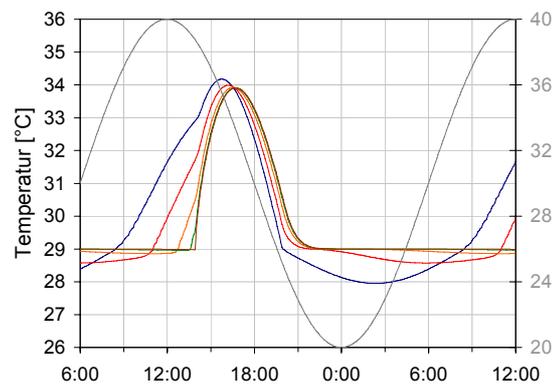


Abb. A6-8a: Temperaturprofil eines PCM 172, $\theta_2 = 29^\circ\text{C}$ mit $\lambda_{\text{solid}} = 1.1 \text{ W/mK}$, $\lambda_{\text{liquid}} = 0.55 \text{ W/mK}$

Blau: Oberflächentemperatur, Rot: $0.25 * d$, Orange: $0.5 * d$, Grün: $0.75 * d$, Braun: d ; $d = 6 \text{ cm}$
 Lufttemperatur (grau – Sekundärachse): $\theta_{RL} = 30.0^\circ\text{C} + 10 \text{ K} * \sin(2\pi/24h * t)$

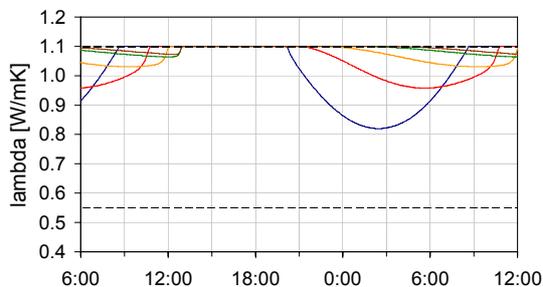


Abb. A6-7 b: Wärmeleitfähigkeit für Abb. A6-3 a mit $\lambda_{\text{solid}} = 0.55 \text{ W/mK}$, $\lambda_{\text{liquid}} = 1.1 \text{ W/mK}$

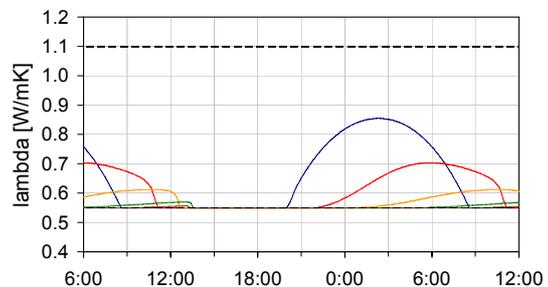


Abb. A6-8 b: Wärmeleitfähigkeit für Abb. A6-4 a mit $\lambda_{\text{solid}} = 1.1 \text{ W/mK}$, $\lambda_{\text{liquid}} = 0.55 \text{ W/mK}$

Blau: λ des OF-Knotens, Rot: λ an der Stelle $0.25 * d$, Orange: λ an der Stelle $0.5 * d$, Grün: λ an der Stelle $0.75 * d$, Braun: λ an der Stelle d ; $d = 6 \text{ cm}$

ANHANG 7

**Temperaturprofile eines zweischichtigen Bauteils:
PCM 16.5, $\lambda = 0.63 \text{ W/mK}$, $\theta_2 = 14^\circ\text{C}$; Mineralwolle $d = 20 \text{ cm}$**

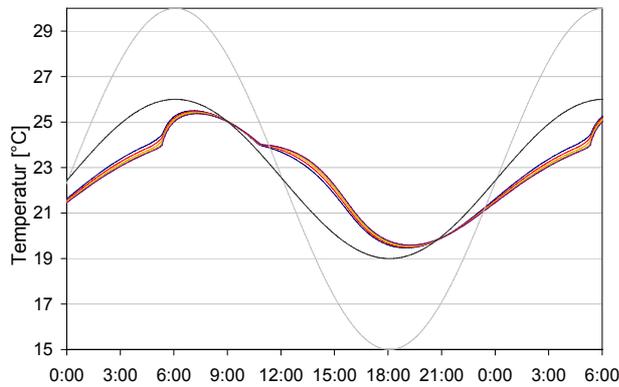


Abb. A7-1: Temperaturprofil, $d = 1 \text{ cm}$

Schwarz: Raumtemperatur, Grau: Außentemperatur, Blau: Oberflächentemperatur, Rot: $0.25 \cdot d$, Orange: $0.5 \cdot d$, Grün: $0.75 \cdot d$, Braun: d

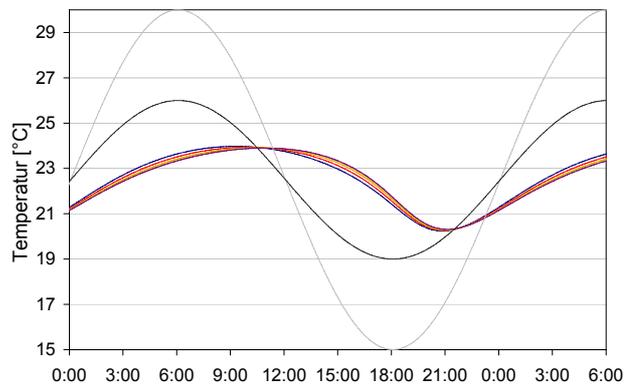


Abb. A7-2: Temperaturprofil, $d = 2 \text{ cm}$

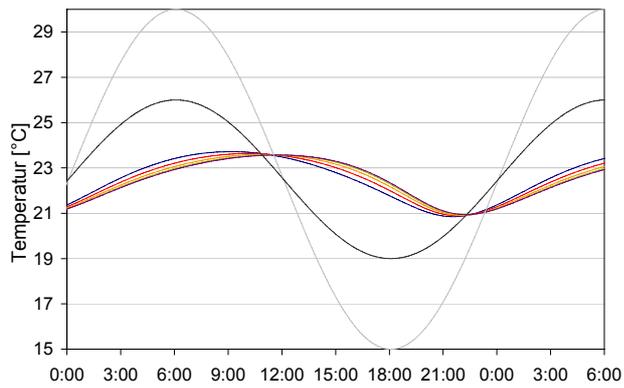


Abb. A7-3: Temperaturprofil, $d = 3 \text{ cm}$

Schwarz: Raumtemperatur, Grau: Außentemperatur, Blau: Oberflächentemperatur, Rot: $0.25 \cdot d$, Orange: $0.5 \cdot d$, Grün: $0.75 \cdot d$, Braun: d

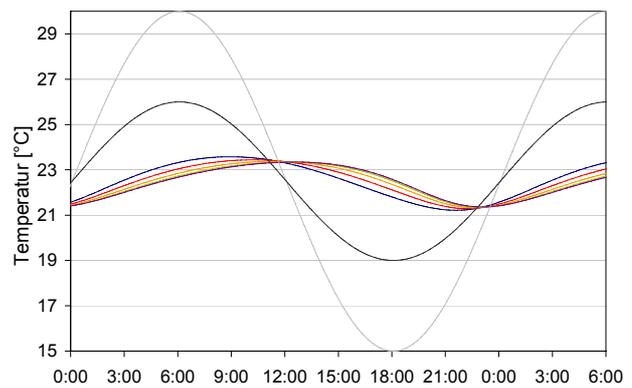


Abb. A7-4: Temperaturprofil, $d = 4 \text{ cm}$

ANHANG 8

Quellcode des PCM-Moduls in ESP-r (/usr/esru/src/esp-r/esrubld/spmatl.f)

```

C ***** 54 *****
C The functions are of the type exponential functions
C Special Material Database
C Default Functionparameter are defined in file databases/mscomp.db1
C *****

subroutine SPWCMF54(ICOMP,ISPMNOD)
#include "building.h"
COMMON/OUTIN/IUOUT,IUIN

C Special materials
common/spmfxs/ispmixi,spflnam
common/spmat/ispmod,ispfloc(mspmnod,3),ispmtyp(mspmnod,2),
&modal(mspmnod),spmdat(mspmnod,mspmnod)
common/spmatlib/ispmlabel(mspmnod)

COMMON/RESSPM/NDATSPM,DATASPM(MSPMNOD,3),STRSPM(MSPMNOD,3)
COMMON/ZONSPM/FZSPMF1(MCOM),ZSPMF2(MCOM)
COMMON/TC/ITC,ICNT
COMMON/TRACE/ITCF,ITRACE(MTRACE),IZNTRC(MCOM),ITU
COMMON/SIMTIM/HRP,IHRF,IDYP,IDWF,IDWP,IDWF,INSINC,ITS
COMMON/FVAL/CTFC(MCOM,MS,MN),QFC(MCOM)
COMMON/FVALS/TFMS(MCOM,MS),QFS(MCOM)
COMMON/TZ/CON(MS,ME),DEN(MS,ME),SHT(MS,ME),THK(MS,ME)

COMMON/PREC1/SNA(MCOM,MS),ZOA(MCOM)
COMMON/PREC13/CJ(MCOM,MS,MN,2),GC(MCOM,MS,MN)
COMMON/VTHP15/VCP(MS,MN,2),QCF(MS,MN)
COMMON/VTHP16/VCF(MS,MN,2),QCF(MS,MN)

C Phase change materials
COMMON/PCM02/SPCM(MCOM,MS,MN),SPCMTF,SPCMTTP
COMMON/PCM03/PCMFAC(MCOM,MS,MN)
COMMON/PCM04/PCMCONFAC(MCOM,MS,MN)
COMMON/PREC9/INCONST(MCOM),NELTS(MCOM,MS),NGAPS(MCOM,MS),
& NFGAP(MCOM,MS,MGF)

COMMON/PERS/ISD1,ISM1,ISD2,ISM2,ISDS,ISDF,NTSTEP

double precision FACTP,FACTF,PCMCONF,PCMCONP
double precision PCMFAC,PCMCONFAC

REAL APPCON,APPSHT,PCMSHT
REAL GODZ,TFCM,SPCMF,SPCMF,SPCM,SPCMC
REAL SHTLIQ,EFTHK,CONPCM

REAL SHTa,SHTb,SHTL-C1
REAL TMELT,TSOLI,CONSOL,CONLIQ,SHTSOL,SHT2
INTEGER IELEM,NLOC,NPCML

character,spmlabel*16,outs*124,spflnam*72,STRSPM*16
logical close

C Obtain the relevant PCM data from the PCM database:
C Melting (teta 1) and solidification (teta 2),temperature , (degC)
TMELT=spmdat(ISPMNOD,1)
TSOLI=spmdat(ISPMNOD,2)

C Conductivity in solid and liquid phase and in mushy region, (W/m*K)
CONSOL=spmdat(ISPMNOD,3)
CONLIQ=spmdat(ISPMNOD,4)

C Specific heat capacity in solid and liquid state
SHTSOL=spmdat(ISPMNOD,5)
SHT2=spmdat(ISPMNOD,6)

C Latent heat of the material
SHTL=spmdat(ISPMNOD,7)
NPCML=spmdat(ISPMNOD,8)
C *****

C Setup variables
icomp=ispfloc(mspmnod,1)
isurf=ispfloc(mspmnod,2)
inode=ispfloc(mspmnod,3)
ielem=niint(real(ispfloc(mspmnod,3)))/2.)
C *****

SHTb=0.76224
SHTa=-SHTb*TSOLI+1.00002397*log(SHTL)-0.271249489
C1=exp(SHTa)

C Calculate maximum value of latent heat (SHTLIQ), (J/kg), i.e. integration
C of c(T)equation from TMELT to TSOLI
SHTLIQ=(C1/(SHTb)*(exp(SHTb*TSOLI)-exp(SHTb*TMELT)))/1000
C *****

C Proceed the calculation for each node of the layer (n-1,n,n+1)
C Location: Surface - Middle - Surface
Do 10 IPHNL=1,3
If (IPHNL.EQ.1) THEN
NLOC=inode-1
EFTHK=THK(isurf,ielem)*0.25
ELSE IF (IPHNL.EQ.2) THEN
NLOC=inode
EFTHK=THK(isurf,ielem)*0.5
ELSE IF (IPHNL.EQ.3) THEN
NLOC=inode+1
EFTHK=THK(isurf,ielem)*0.25
ENDIF

C TFCM is the temperature of the PCM material node
C nodal Temp internal : TFCM = TFC in degC
C nodal Temp on surface : TFCM = TFS in degC
IF (IPHNL.EQ.3.AND.IELEM.EQ.NELTS(icomp,isurf))
TFCM=TFS(icomp,isurf)
ELSE
TFCM=TFC(icomp,isurf,NLOC)
ENDIF

C Calculate Conductivity and Specific Heat from function
SPCM=SPCM(icomp,isurf,NLOC)
IF (TFCMLT,TMELT) THEN
APPCON=CONSOL
APPSHT=SHTSOL
ELSE IF (TFCM.GT.TSOLI) THEN
APPCON=CONLIQ
APPSHT=SHT2
ELSE
APCON=(SPCMC/SHTLIQ)*CONLIQ+
& ((SHTLIQ-SPCMC/SHTLIQ)*CONSOL
APPSHT=C*1*exp(SHTb*TFCM)+SHTSOL
ENDIF

C Read value of present factor con/sht from common block
C factor FACTP is the factor to multiply with Fourier-Coeff
C heat conduction calculation (present timestep)
FACTP=PCMFAC(icomp,isurf,NLOC)
PCMCONP=PCMCONFAC(icomp,isurf,NLOC)

C Calculate new rate of con and sht and future factor com:
PCMCONF=APPCON/CONSOL
PCMSHT=APPSHT/SHTSOL
FACTF=1/PCMSHT

C Save value of future factor con/sht to common block.
PCMFAC(icomp,isurf,NLOC)=FACTF
PCMCONFAC(icomp,isurf,NLOC)=PCMCONF

C Modify present and future value of 'C' and 'QC' coefficient
IF (IPHNL.EQ.3.AND.IELEM.EQ.NELTS(icomp,isu
VCP(isurf,NLOC,1)=C(icomp,isurf,NLOC,1)*FACTP*Pi
VCP(isurf,NLOC,2)=C(icomp,isurf,NLOC,2)*FACTP*Pi
QCP(isurf,NLOC)=QC(icomp,isurf,NLOC)*FACTP
VCF(isurf,NLOC,1)=C(icomp,isurf,NLOC,1)*FACTF*Pi
VCF(isurf,NLOC,2)=C(icomp,isurf,NLOC,2)*FACTF
QCF(isurf,NLOC)=QC(icomp,isurf,NLOC)*FACTF
ELSE IF (IPHNL.EQ.1.AND.IELEM.EQ.NELTS(icom
& THEN
VCP(isurf,NLOC,1)=C(icomp,isurf,NLOC,1)*FACTP
VCP(isurf,NLOC,2)=C(icomp,isurf,NLOC,2)*FACTP*Pi
QCP(isurf,NLOC)=QC(icomp,isurf,NLOC)*FACTP
VCF(isurf,NLOC,1)=C(icomp,isurf,NLOC,1)*FACTF
VCF(isurf,NLOC,2)=C(icomp,isurf,NLOC,2)*FACTF
QCF(isurf,NLOC)=QC(icomp,isurf,NLOC)*FACTF

```

```

ELSE
VCP(isurf,NLOC,1)=C*(icomp,isurf,NLOC,1)*FACTP*PCMCONP
VCP(isurf,NLOC,2)=C*(icomp,isurf,NLOC,2)*FACTP*PCMCONP
QC(isurf,NLOC)=QC*(icomp,isurf,NLOC)*FACTP
VCF(isurf,NLOC,1)=C*(icomp,isurf,NLOC,1)*FACTF*PCMCONF
VCF(isurf,NLOC,2)=C*(icomp,isurf,NLOC,2)*FACTF*PCMCONF
QC(isurf,NLOC)=QC*(icomp,isurf,NLOC)*FACTF
ENDIF

C Calculate the value of latent heat (J), stored in part PCM layer
C represented by each node of PCM layer.
C The latent heat stored in the PCM layer is the integration of the
C apparent heat equation from TMELT to TFCM.
C First the present value of heat stored read from common block.
SPCMP=SPCM*(icomp,isurf,NLOC)
C Now calculate the future value of heat stored [J].
IF(TFCM.LT.TMELT) THEN
  SPCMF=0.0
  ELSE IF(TFCM.GT.TSOLI) THEN
    SPCMF=SHTLIQ
  ELSE
    SPCMF=(C/1(SHTb)*exp(SHTb*(TFCM)-(C/1(SHTb)*exp(SHTb*TMELT)))/1000
  ENDIF

C Save future value of latent heat stored to common block.
SPCM(icomp,isurf,NLOC)=SPCMF

10 CONTINUE

C Output of Surface results
SPCMTF=SPCM(icomp,isurf,1)+SPCM(icomp,isurf,2)
& +SPCM(icomp,isurf,3)
NDATSPM=1
DATASPM(ISPMNOD,1)=(SPCMTF+SPCMTF)/2.
STRSPM(ISPMNOD,1)=Heat stored (J)
SPCMTF=SPCMTF

C Also (as a temporary results recovery measure) pass results output(s)
C to zone based variable ZSPM1 for storage in the results library
C the output is limited to ONE special material per zone!
ZSPMF1(ISPMLOC(ISPMNOD,1))=DATASPM(ISPMNOD,1)

C Trace output.
IF(ITC.LE.0.OR.NSINC.LT.ITC.OR.ISOMXIST.EQ.0) goto 998
& IZNTTRC(ICOMP,NE,1) goto 998
write(outs,'(a)') Hallo, das ist neu hier
call edisp(tu,outs)
write(outs,'(a)')
call edisp(tu,outs)
write(outs,'(a)')
call edisp(tu,outs)
write(outs,'(a)')
call edisp(tu,outs)
write(outs,'(a)')
write(outs,'(a)')
Trace output for Special materials'
call edisp(tu,outs)
call edisp(tu,outs)
write(outs,'(a)') heat capacity, latent heat, conductivity
call edisp(tu,outs)
write(outs,'(a)')
write(outs,'(a,2)') Subroutine SMCMP54 for : spmlabel((SPMNOD)

```

```

call edisp(tu,outs)
write(outs,'(a,1x,f10.1)') Latent heat [kJ/kg]': SHTLIQ
call edisp(tu,outs)
write(outs,'(a,2x,i4,2x,i4,2x,i4,2x,i4,2x,i4)')
& Affected zone, surface and nodes :icomp,isurf,inode-1,inode,
& ,inode+1
call edisp(tu,outs)

DO 20 IPHNL=1,3
IF (IPHNL.EQ.1) THEN
write(outs,'(a)')
call edisp(tu,outs)
write(outs,'(a)')
call edisp(tu,outs)
write(outs,'(a,3)') External node of PCM-layer,NLOC-2
call edisp(tu,outs)
write(outs,'(a,1x,f10.2)') FACTF',FACTF',FACTF
write(outs,'(a,1x,f10.1)') PCMCONF',PCMCONF
call edisp(tu,outs)
write(outs,'(a,1x,f10.2)') FACTP',FACTP
call edisp(tu,outs)
write(outs,'(a,1x,f10.3)') PCMCONP',PCMCONP
call edisp(tu,outs)
ELSE IF (IPHNL.EQ.2) THEN
write(outs,'(a)')
call edisp(tu,outs)
write(outs,'(a)')
call edisp(tu,outs)
write(outs,'(a,3)') Middle node of PCM-layer,NLOC-1
call edisp(tu,outs)
write(outs,'(a,1x,f10.2)') NELTS',NELTS'(icomp,isurf)
call edisp(tu,outs)
write(outs,'(a,1x,f10.1)') CONLIQ',CONLIQ
call edisp(tu,outs)
write(outs,'(a,1x,f10.2)') CONSOL',CONSOL
call edisp(tu,outs)
write(outs,'(a,1x,f10.3)') Appcon',APPCON
call edisp(tu,outs)
ELSE
write(outs,'(a)')
call edisp(tu,outs)
write(outs,'(a)')
call edisp(tu,outs)
write(outs,'(a,3)') Internal node of PCM-layer,NLOC
call edisp(tu,outs)
write(outs,'(a,1x,f10.2)') PCMCONF',PCMCONF
call edisp(tu,outs)
write(outs,'(a,1x,f10.1)') PCMSHT',PCMSHT
call edisp(tu,outs)
write(outs,'(a,1x,f10.2)') FACTF',FACTF
call edisp(tu,outs)
write(outs,'(a,1x,f10.3)') PCMFAC',PCMFAC
call edisp(tu,outs)

ENDIF
20 CONTINUE

998 RETURN
end

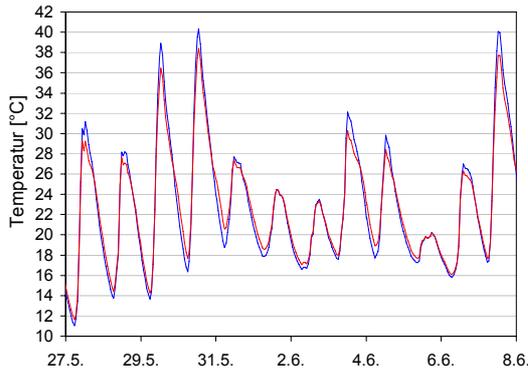
```

```

C ***** 55 *****
C The functions used are of the type "rational functions" (gebrochen rationale)
C
C Special Material Database
C Parameter are defined in file databases/mscomp.db1
C
C *****
subroutine SPMCMF55(ICOMP,ISPMNOD)
#include "building.h"
COMMON/OUTIN/IOOUT,IJIN
C Special materials
common/spmfxs/spmfxist,spfnam
common/spmall/ispmod,isploc(mspmnod,3),ispmtyp(mspmnod,2),
&nncdat(mspmnod),spmdat(mspmnod,ispmdat)
common/spmatbl/spmatlabl(mspmnod)
COMMON/RESSPM/NDATSPM,DATASPM(MSPMNOD,3),STRSPM(MSPMNOD,3)
COMMON/ZONSPMF/ZSPMF(MCOM),ZSPMF2(MCOM)
COMMON/ITC/ICNT
COMMON/TRACE/ITRACE(ITRACE),IZNTTRC(MCOM),ITU
COMMON/SIMTIM/HRP,IHRF,IDYP,IDYF,IDWF,NSINC,ITS
COMMON/FVALC/TFC(MCOM,MS,MN),QFC(MCOM)
COMMON/FVALS/TFS(MCOM,MS),QFS(MCOM)
COMMON/T2/CON(MS,ME),DEN(MS,ME),SHT(MS,ME),THK(MS,ME)
COMMON/PREC1/SNA(MCOM,MS),ZOA(MCOM)
COMMON/PREC13/CMCOM,MS,MN,2),QC(MCOM,MS,MN)
COMMON/VTHP/15VCF(MS,MN,2),QCF(MS,MN)
COMMON/VTHP/16VCF(MS,MN,2),QCF(MS,MN)
C Phase change materials
COMMON/PCM02/SFCM(MCOM,MS,MN),SPCMTF,SPCMTF
COMMON/PCM03/PCMFAC(MCOM,MS,MN)
COMMON/PREC9/NCONST(MCOM),NELTS(MCOM,MS),NGAPS(MCOM,MS),
& NPGAP(MCOM,MS,MGP)
COMMON/PERS/ISD1,ISM1,ISD2,ISM2,ISDS,ISDF,NTSTEP
double precision PCMFAC
REAL APPCON, APPSHT, PCMSHT, FACTP, FACTF
REAL GODZ, TFCM, SPCMP, SPCMF, SPCM
REAL SHTLIQ, EFTHK, PCMCON, CONPCM
REAL SHTa, SHTb, SHTc, SHTd, SHTe
REAL C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9
REAL SHTLIQ1, SHTLIQ2, SHTLIQ3
REAL SPCMF1, SPCMF2, SPCMF3, SPCMF4, SPCMF5
REAL TMELT, TSOLI, CONSOL, CONLIQ, SHTSOL, SHT2
INTEGER IELEM, NLOC
character, spmlabel*16,outs*124,spfnam*72,STRSPM*16
logical close

```


ANHANG 9



Validierung des numerischen Modells durch Vergleich von Messung und Simulation mit Variation von Putzschichtdicke und Lüftungsregime

Abb. A9-1 a: Gemessene Lufttemperaturen, 1 cm Putz, keine mech. Lüftung

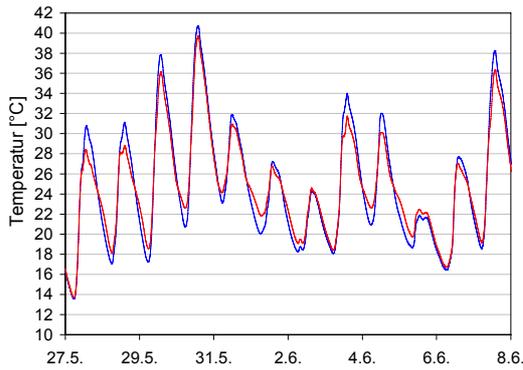


Abb. A9-1 b: Simulierte Lufttemperaturen (*) 1 cm, keine mech. Lüftung

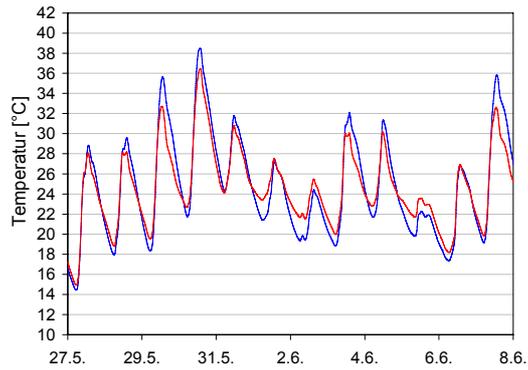


Abb. A9-1 e: Simulierte Lufttemperaturen 3 cm, keine mech. Lüftung

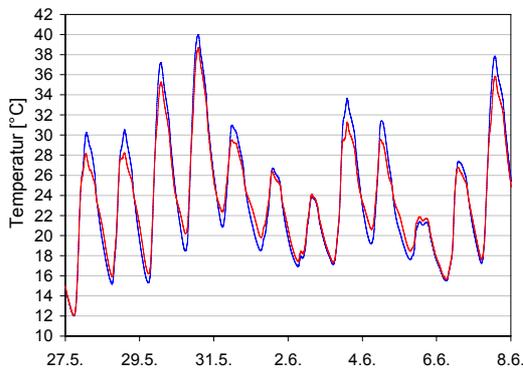


Abb. A9-1 c: Simulierte Lufttemperaturen 1 cm, Nachtlüftung – Luftwechselrate 2/h

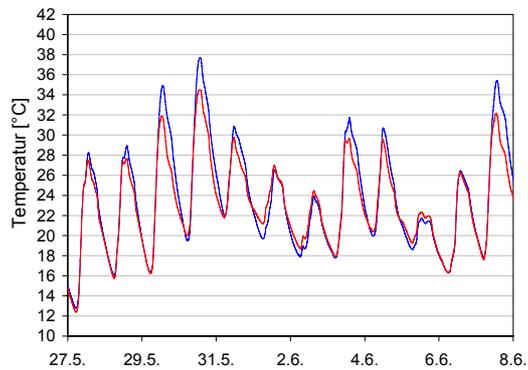


Abb. A9-1 f: Simulierte Lufttemperaturen 3 cm, Nachtlüftung – Luftwechselrate 2/h

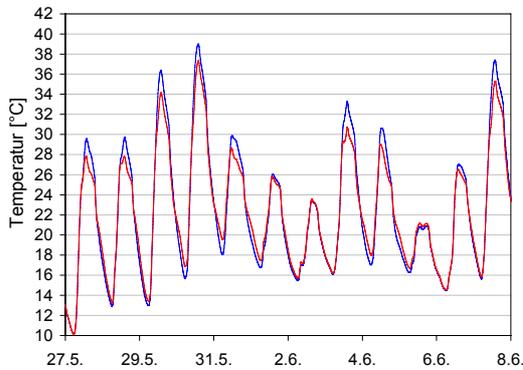


Abb. A9-1 d: Simulierte Lufttemperaturen 1 cm, Nachtlüftung – Luftwechselrate 4/h

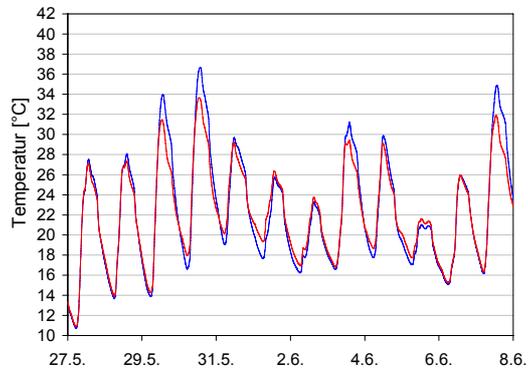


Abb. A9-1 g: Simulierte Lufttemperaturen 3 cm, Nachtlüftung – Luftwechselrate 4/h

Blau: Lufttemperatur ohne PCM, Rot: Lufttemperatur mit PCM; Nachtlüftung jeweils von 19 h - 7 h

(*): Simulationsmodell entspricht den Angaben aus Tab. 7-1

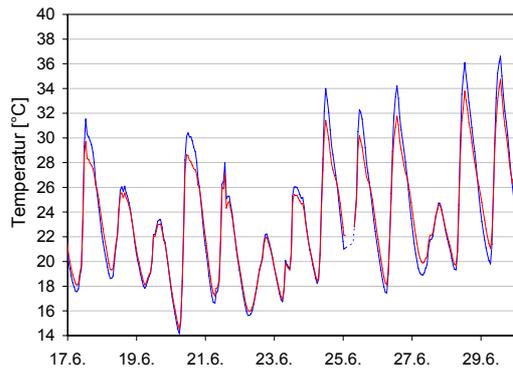


Abb. A9-2 a: Gemessene Lufttemperaturen, 1 cm Putz, keine mech. Lüftung

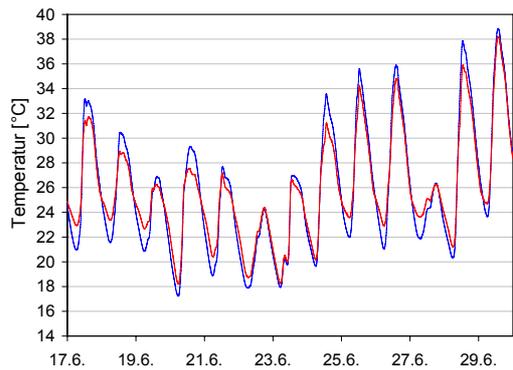


Abb. A9-2 b: Simulierte Lufttemperaturen (*) 1 cm, keine mech. Lüftung

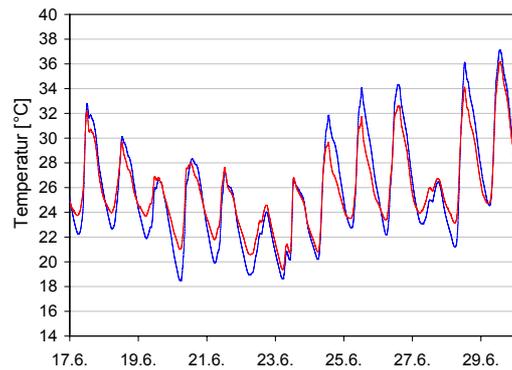


Abb. A9-2 e: Simulierte Lufttemperaturen 3 cm, keine mech. Lüftung

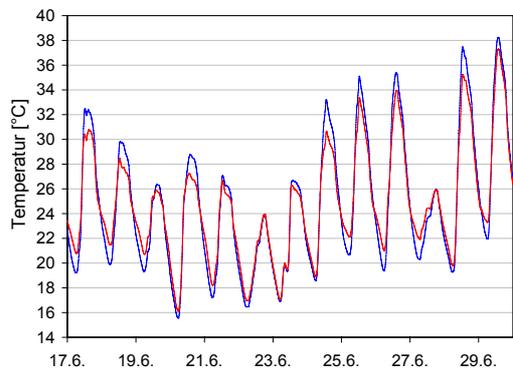


Abb. A9-2 c: Simulierte Lufttemperaturen 1 cm, Nachtlüftung – Luftwechselrate 2/h

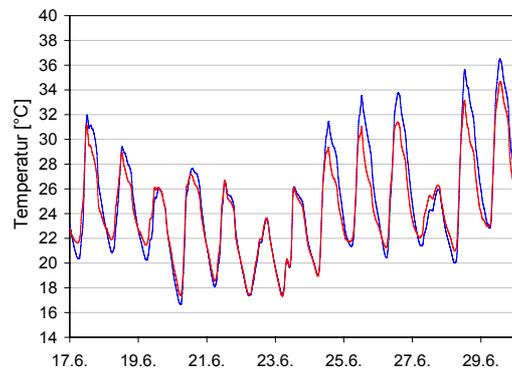


Abb. A9-2 f: Simulierte Lufttemperaturen 3 cm, Nachtlüftung – Luftwechselrate 2/h

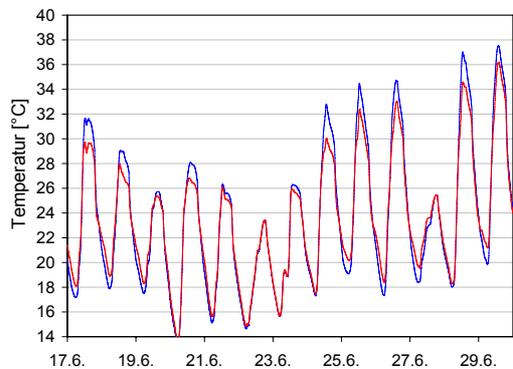


Abb. A9-2 d: Simulierte Lufttemperaturen 1 cm, Nachtlüftung – Luftwechselrate 4/h

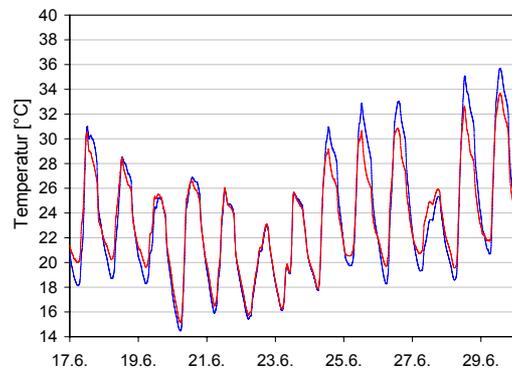


Abb. A9-2 g: Simulierte Lufttemperaturen 3 cm, Nachtlüftung – Luftwechselrate 4/h

Blau: Lufttemperatur ohne PCM, Rot: Lufttemperatur mit PCM; Nachtlüftung jeweils von 19 h - 7 h

(*): Simulationsmodell entspricht den Angaben aus Tab. 7-1

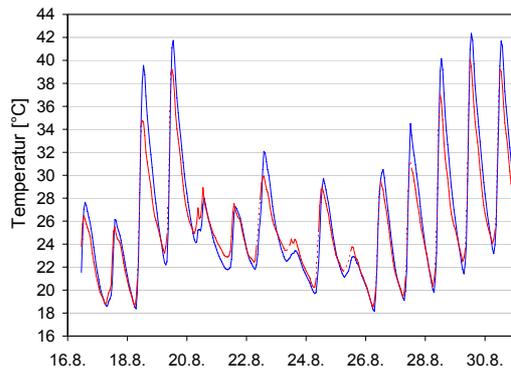


Abb. A9-3 a: Gemessene Lufttemperaturen, 3 cm Putz, keine mech. Lüftung

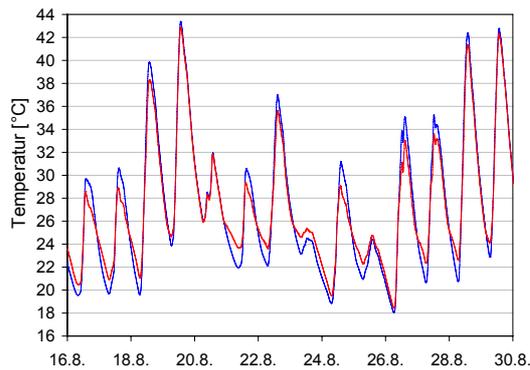


Abb. A9-3 b: Simulierte Lufttemperaturen 1 cm, keine mech. Lüftung

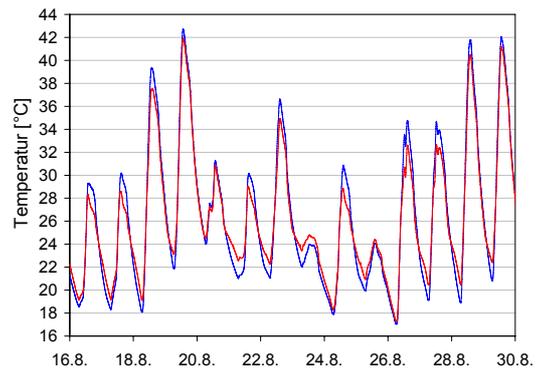


Abb. A9-3 e: Simulierte Lufttemperaturen (*) 3 cm, keine mech. Lüftung

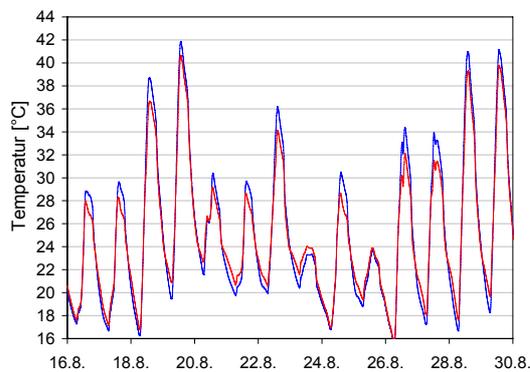


Abb. A9-3 c: Simulierte Lufttemperaturen 1 cm, Nachtlüftung – Luftwechselrate 2/h

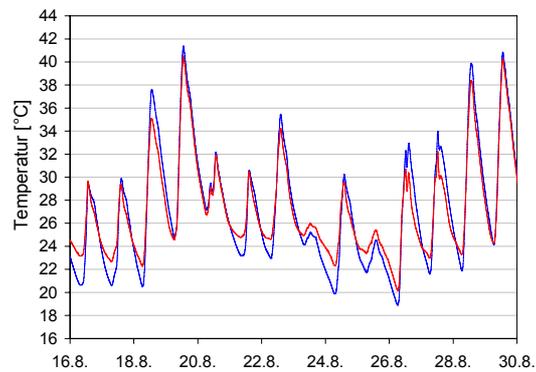


Abb. A9-3 f: Simulierte Lufttemperaturen 3 cm, Nachtlüftung – Luftwechselrate 2/h

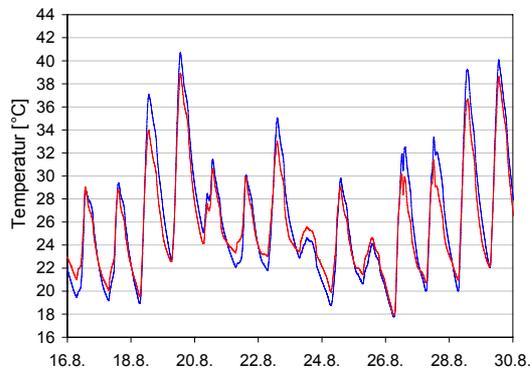


Abb. A9-3 d: Simulierte Lufttemperaturen 1 cm, Nachtlüftung – Luftwechselrate 4/h

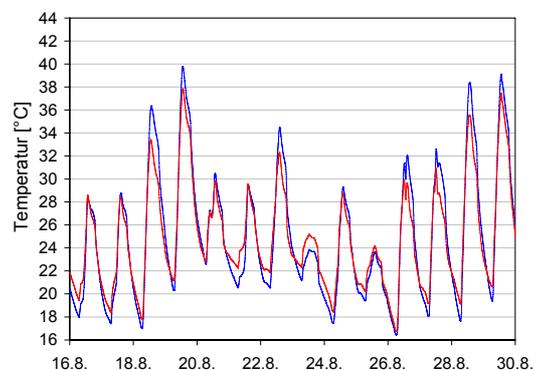


Abb. A9-3 g: Simulierte Lufttemperaturen 3 cm, Nachtlüftung – Luftwechselrate 4/h

Blau: Lufttemperatur ohne PCM, Rot: Lufttemperatur mit PCM; Nachtlüftung jeweils von 19 h - 7 h

(*): Simulationsmodell entspricht den Angaben aus Tab. 7-1

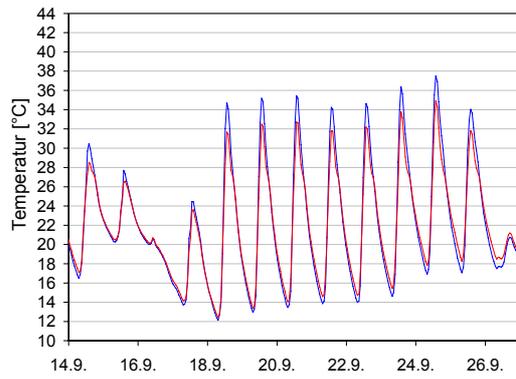


Abb. A9-4 a: Gemessene Lufttemperaturen, 3 cm Putz, keine mech. Lüftung

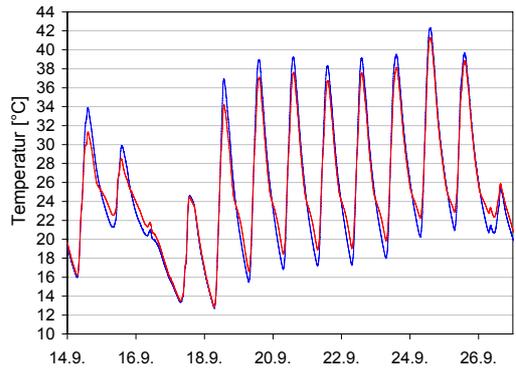


Abb. A9-4 b: Simulierte Lufttemperaturen 1 cm, keine mech. Lüftung

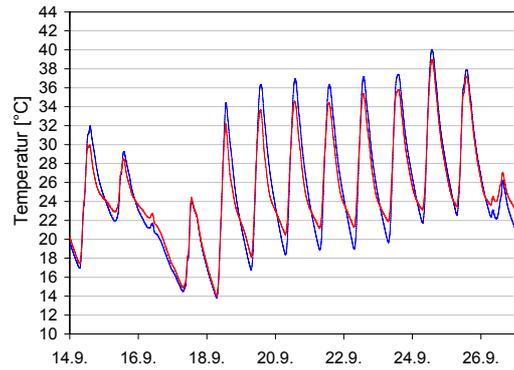


Abb. A9-4 e: Simulierte Lufttemperaturen 3 cm, keine mech. Lüftung

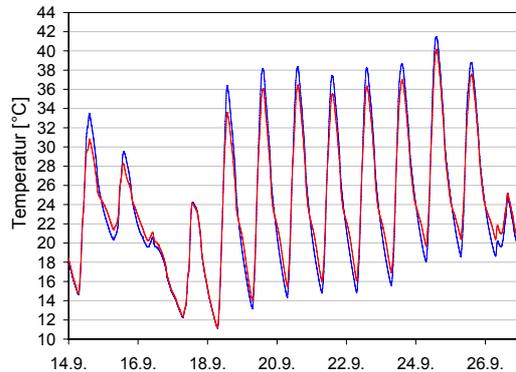


Abb. A9-4 c: Simulierte Lufttemperaturen 1 cm, Nachtlüftung – Luftwechselrate 2/h

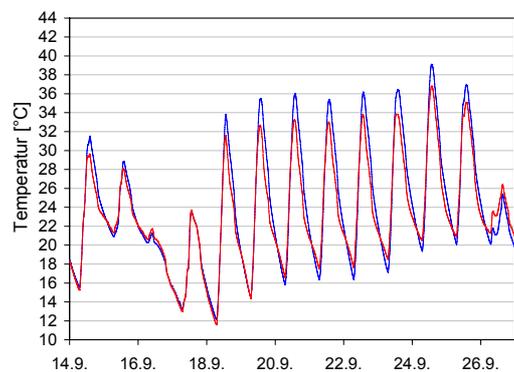


Abb. A9-4 f: Simulierte Lufttemperaturen 3 cm, Nachtlüftung – Luftwechselrate 2/h

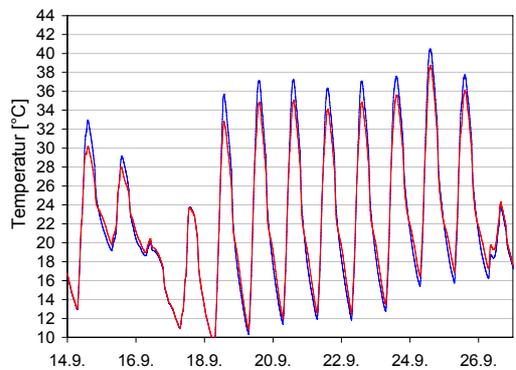


Abb. A9-4 d: Simulierte Lufttemperaturen 1 cm, Nachtlüftung – Luftwechselrate 4/h

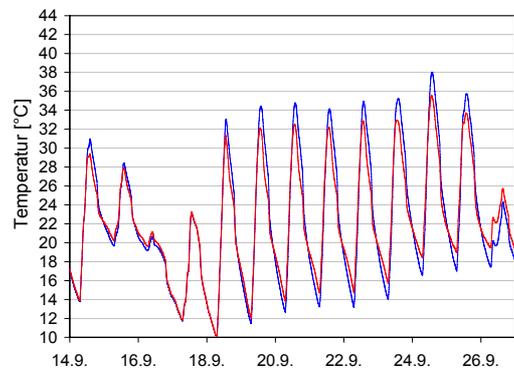


Abb. A9-4 g: Simulierte Lufttemperaturen (*) 3 cm, Nachtlüftung – Luftwechselrate 4/h

Blau: Lufttemperatur ohne PCM, Rot: Lufttemperatur mit PCM; Nachtlüftung jeweils von 19 h - 7 h

(*): Simulationsmodell entspricht den Angaben aus Tab. 7-1

ANHANG 10

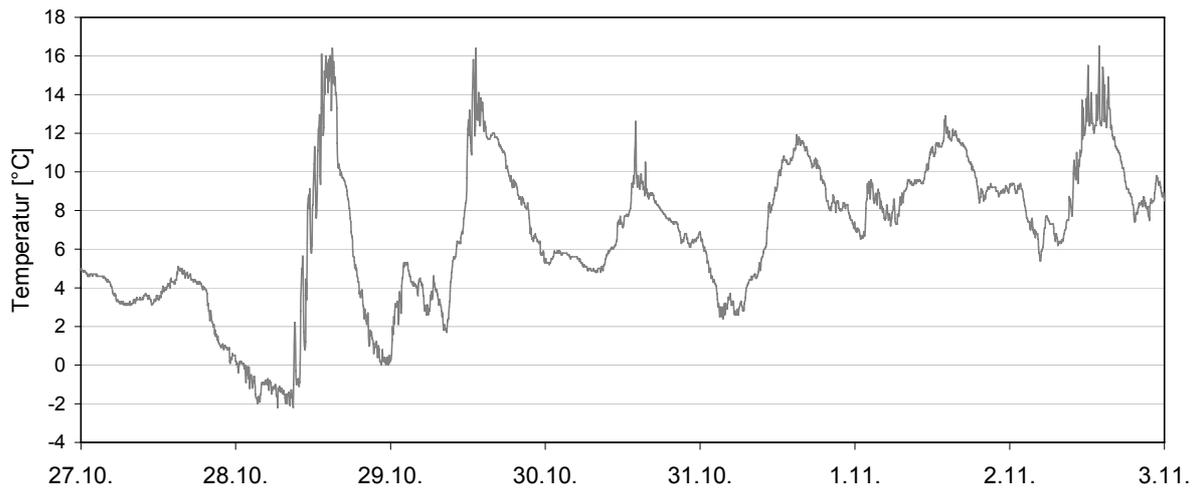


Abb. A10-1: Außenlufttemperaturmessung Kalenderwoche 44 / 2003

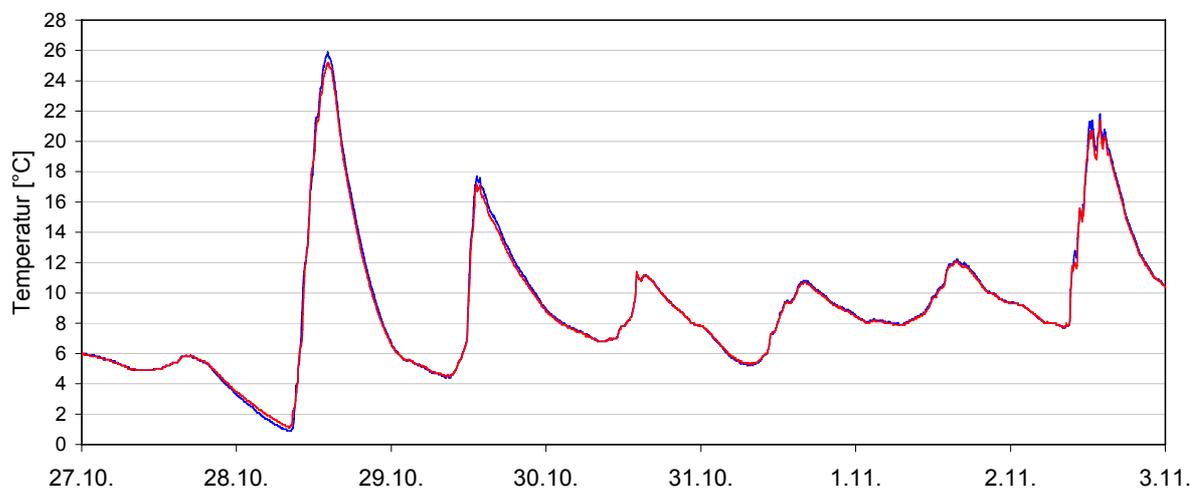


Abb. A10-2: Raumlufttemperaturmessung ohne Putz, Kalenderwoche 44 / 2003 (Nullmessung zum Abgleich des thermischen Verhaltens der Räume); Blau: ohne PCM; Rot: mit PCM

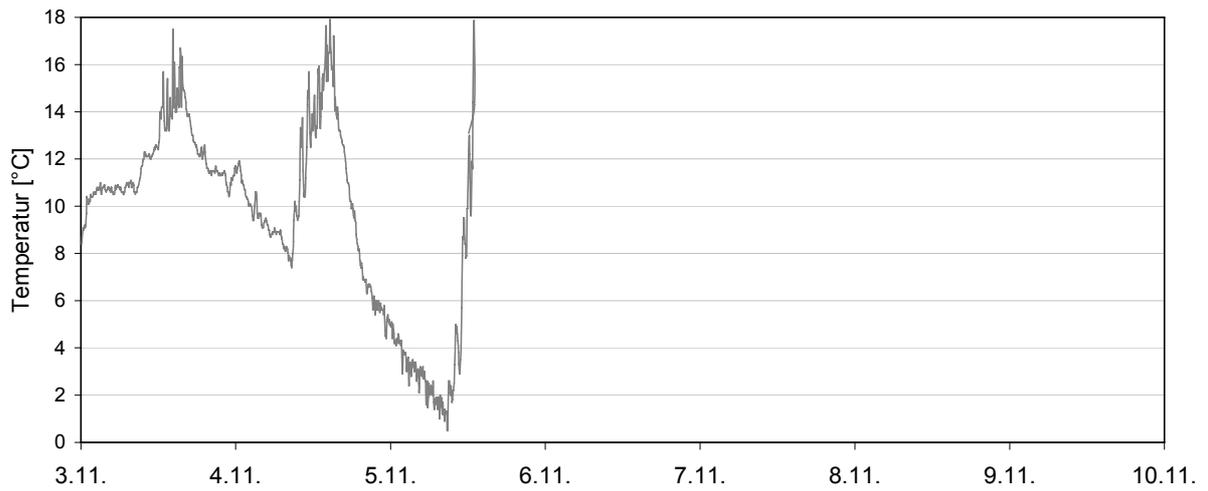


Abb. A10-3: Außenlufttemperaturmessung Kalenderwoche 45 / 2003

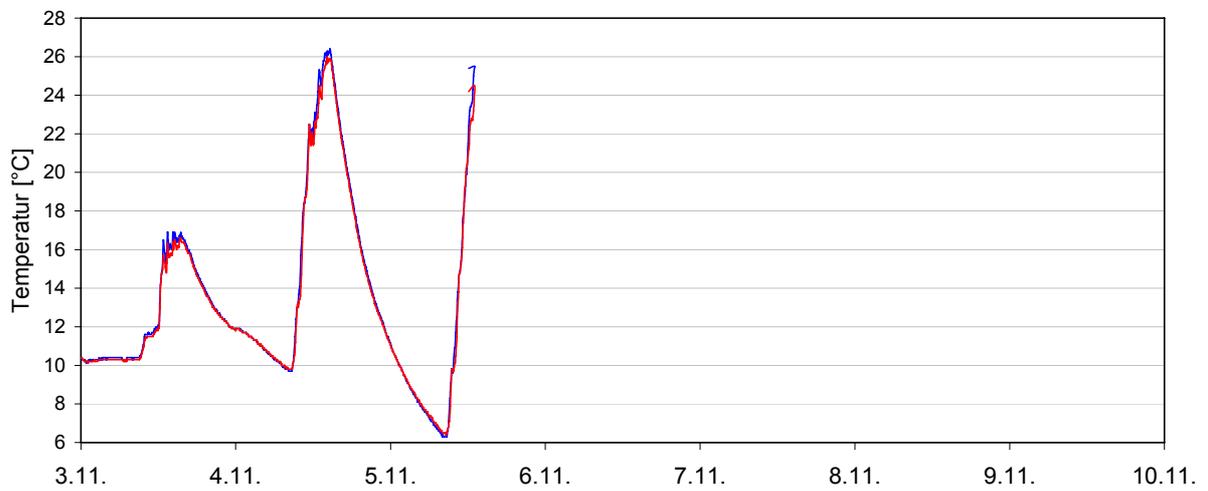


Abb. A10-4: Raumlufthtemperaturmessung ohne Putz, Kalenderwoche 44 / 2003 (Nullmessung zum Abgleich des thermischen Verhaltens der Räume); Blau: ohne PCM; Rot: mit PCM

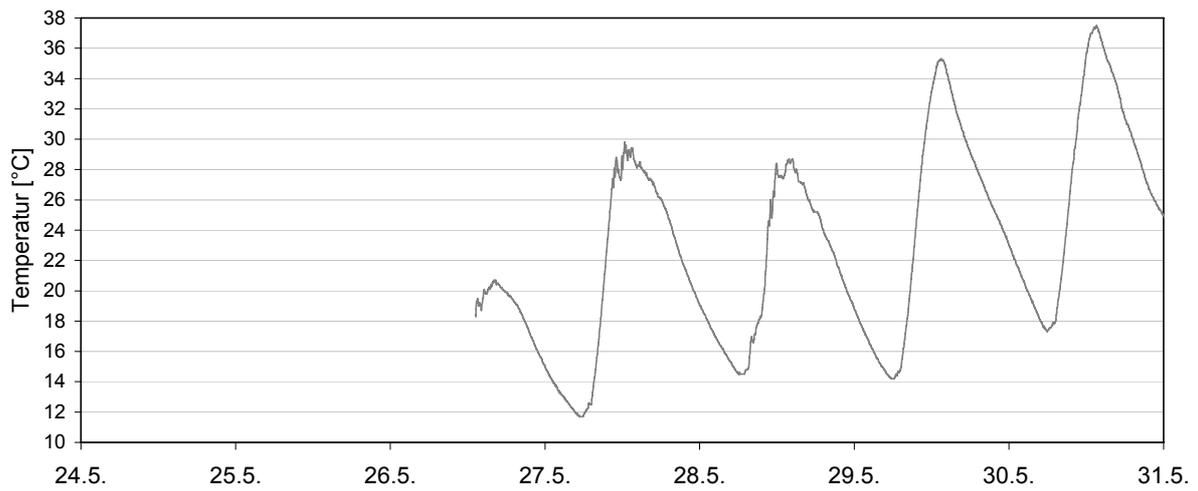


Abb. A10-5: Außenlufttemperaturmessung Kalenderwoche 22 / 2004

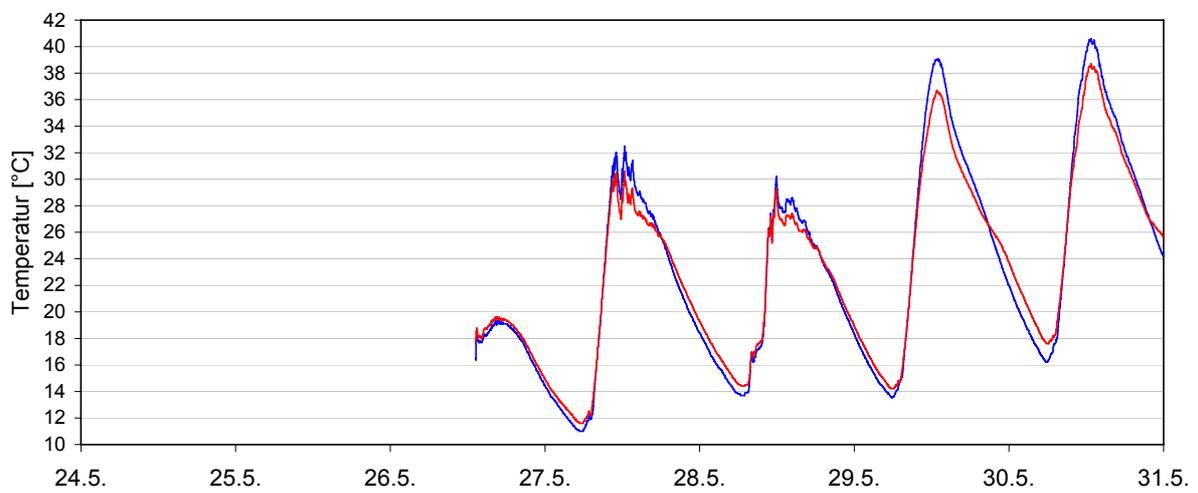


Abb. A10-6: Raumlufttemperaturmessung 1 cm Putz, Kalenderwoche 22 / 2004

Blau: ohne PCM; Rot: mit PCM

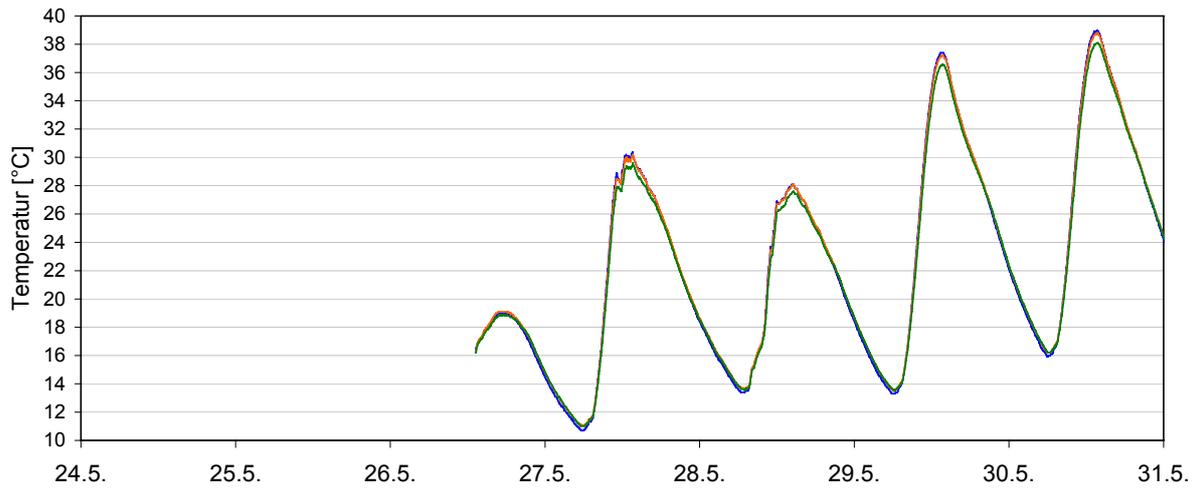


Abb. A10-7: Temperaturprofilmessung Messpunkt 5, 1 cm Gips-Platz, Kalenderwoche 22 / 2004

Blau: Oberfläche; Orange: 0.5 cm; Grün: 1 cm

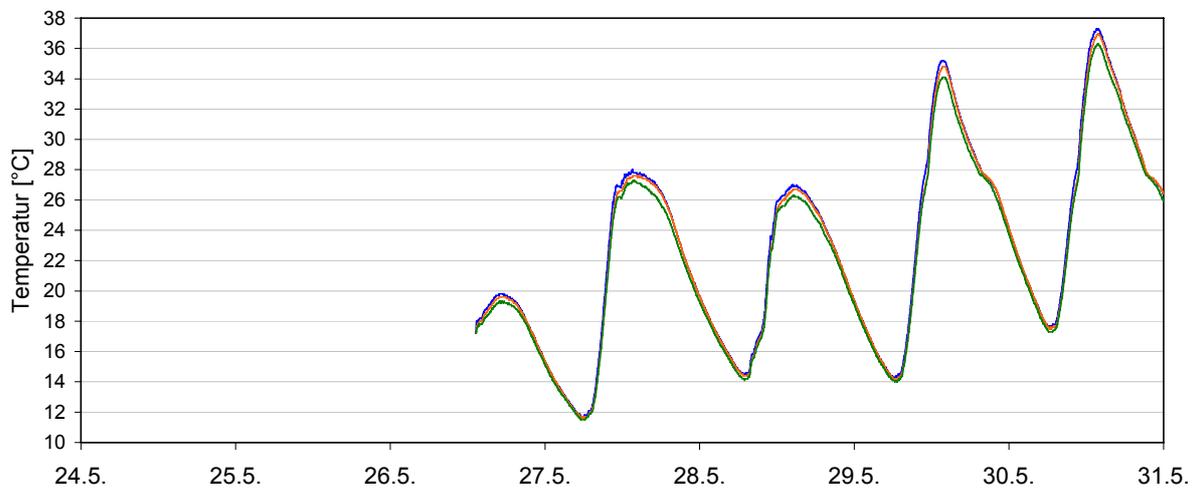


Abb. A10-8: Temperaturprofilmessung Messpunkt 5, 1 cm PCM-Platz, Kalenderwoche 22 / 2004

Blau: Oberfläche; Orange: 0.5 cm; Grün: 1 cm

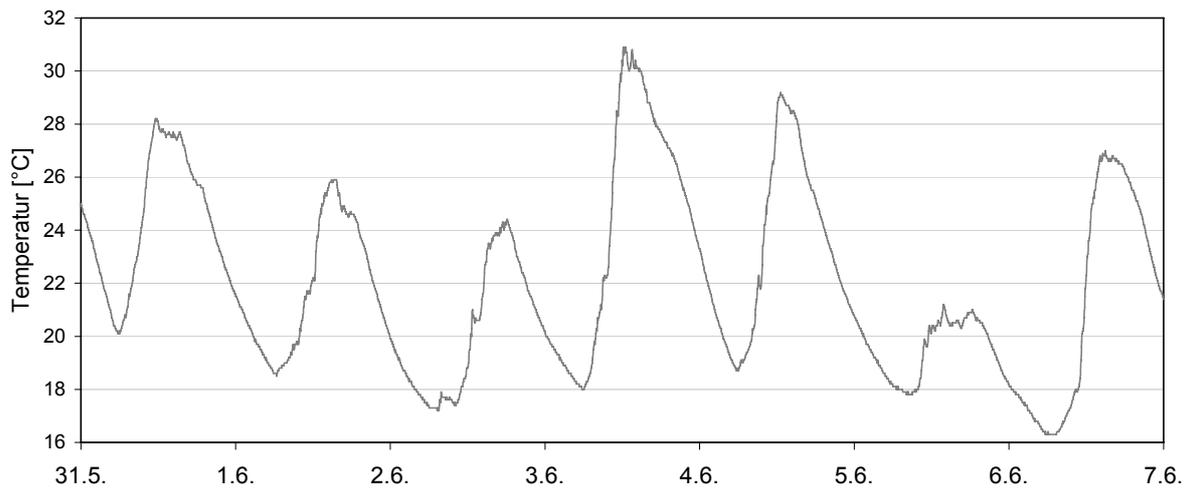


Abb. A10-9: Außenlufttemperaturmessung Kalenderwoche 23 / 2004

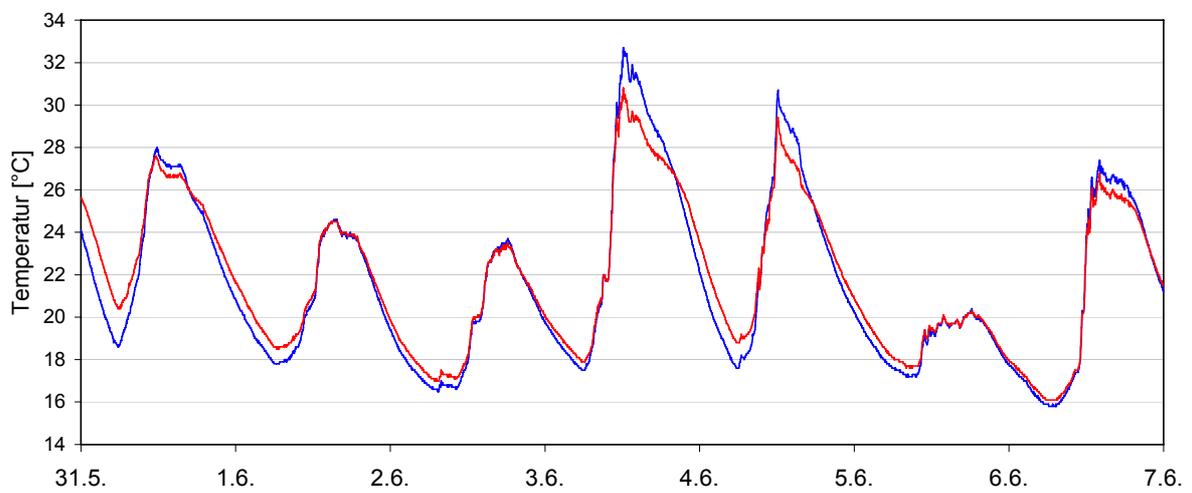


Abb. A10-10: Raumlufthtemperaturmessung 1 cm Putz, Kalenderwoche 23 / 2004

Blau: ohne PCM; Rot: mit PCM

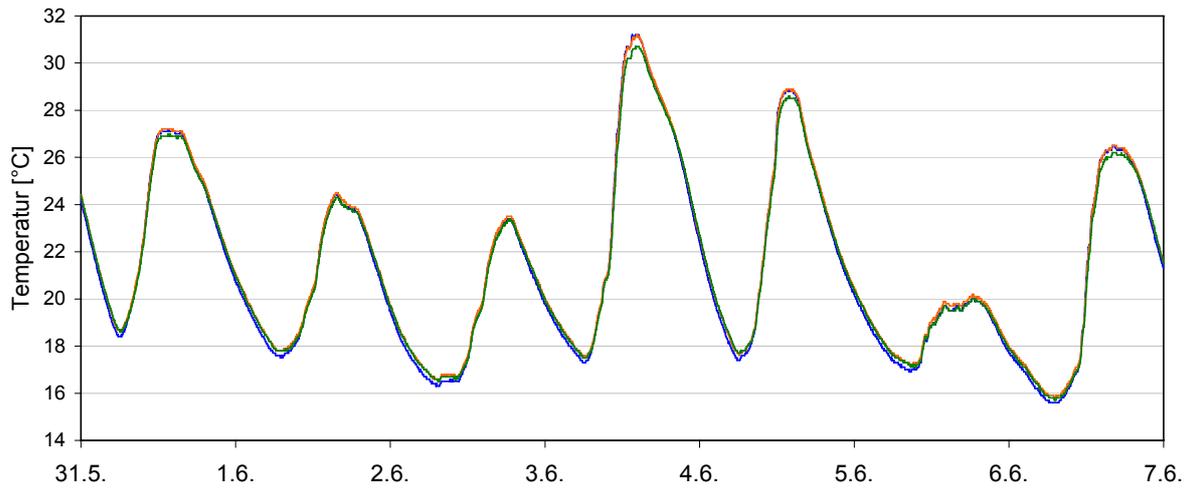


Abb. A10-11: Temperaturprofilmessung Messpunkt 5, 1 cm Gips-Platz, Kalenderwoche 23 / 2004

Blau: Oberfläche; Orange: 0.5 cm; Grün: 1 cm

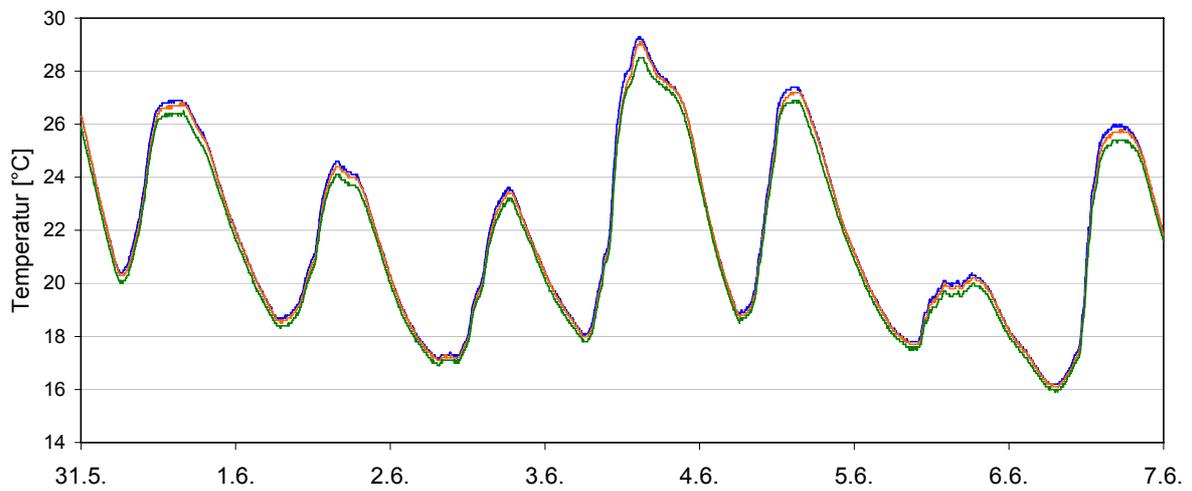


Abb. A10-12: Temperaturprofilmessung Messpunkt 5, 1 cm PCM-Platz, Kalenderwoche 23 / 2004

Blau: Oberfläche; Orange: 0.5 cm; Grün: 1 cm

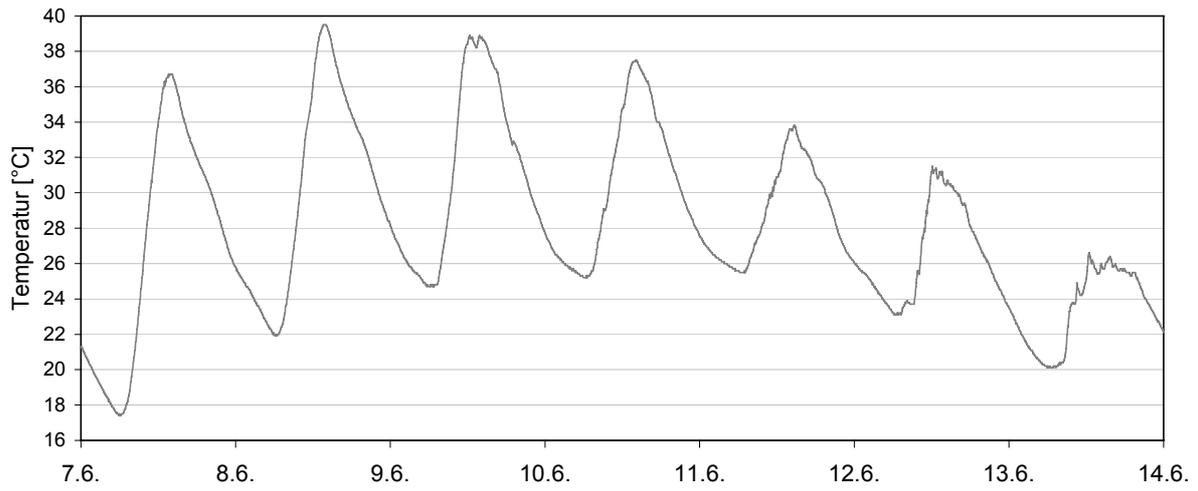


Abb. A10-13: Außenlufttemperaturmessung Kalenderwoche 24 / 2004

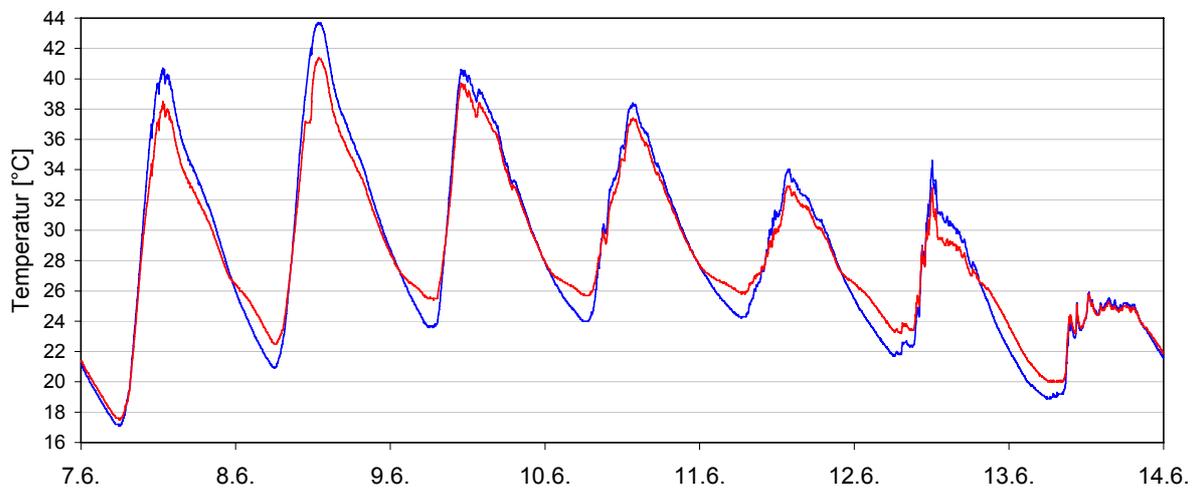


Abb. A10-14: Raumlufttemperaturmessung 1 cm Putz, Kalenderwoche 24 / 2004

Blau: ohne PCM; Rot: mit PCM

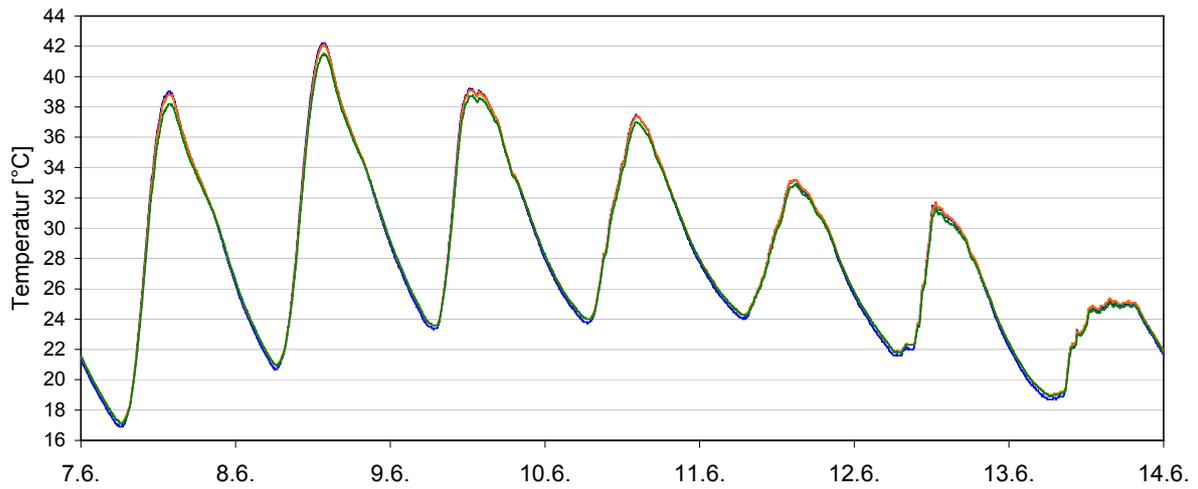


Abb. A10-15: Temperaturprofilmessung Messpunkt 5, 1 cm Gips-Putz, Kalenderwoche 24 / 2004

Blau: Oberfläche; Orange: 0.5 cm; Grün: 1 cm

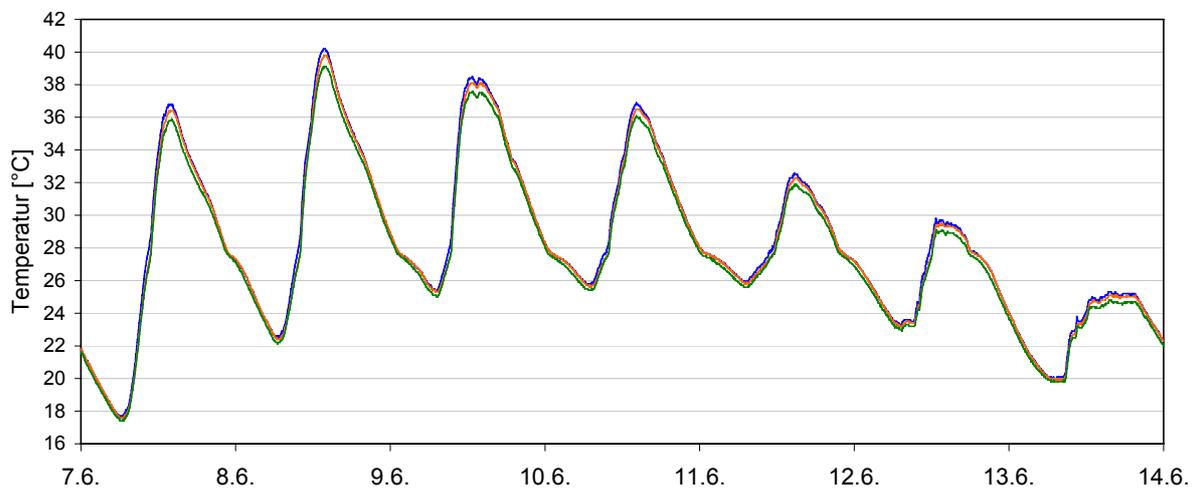


Abb. A10-16: Temperaturprofilmessung Messpunkt 5, 1cm PCM-Putz, Kalenderwoche 24 / 2004

Blau: Oberfläche; Orange: 0.5cm; Grün: 1 cm

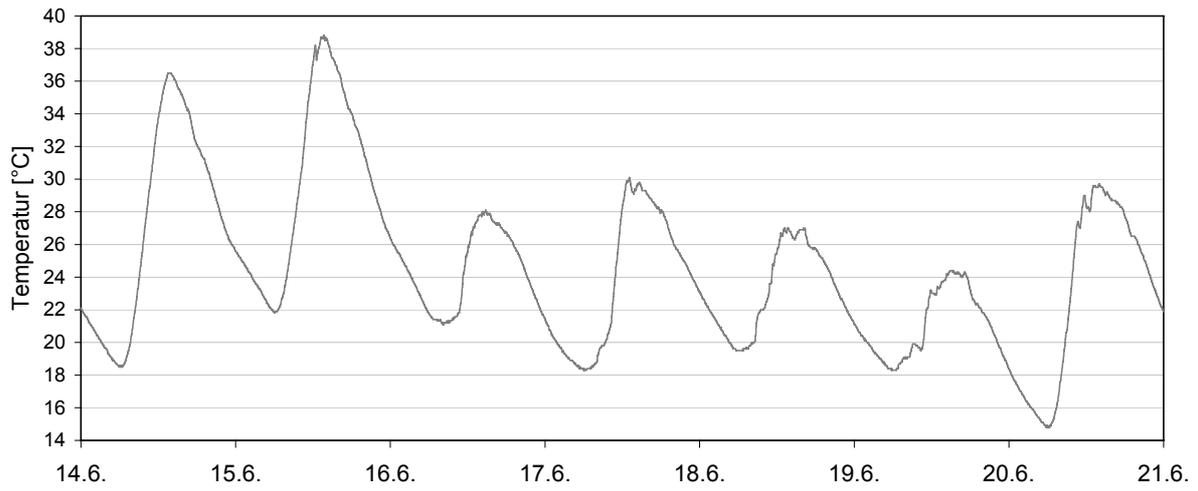


Abb. A10-17: Außenlufttemperaturmessung Kalenderwoche 25 / 2004

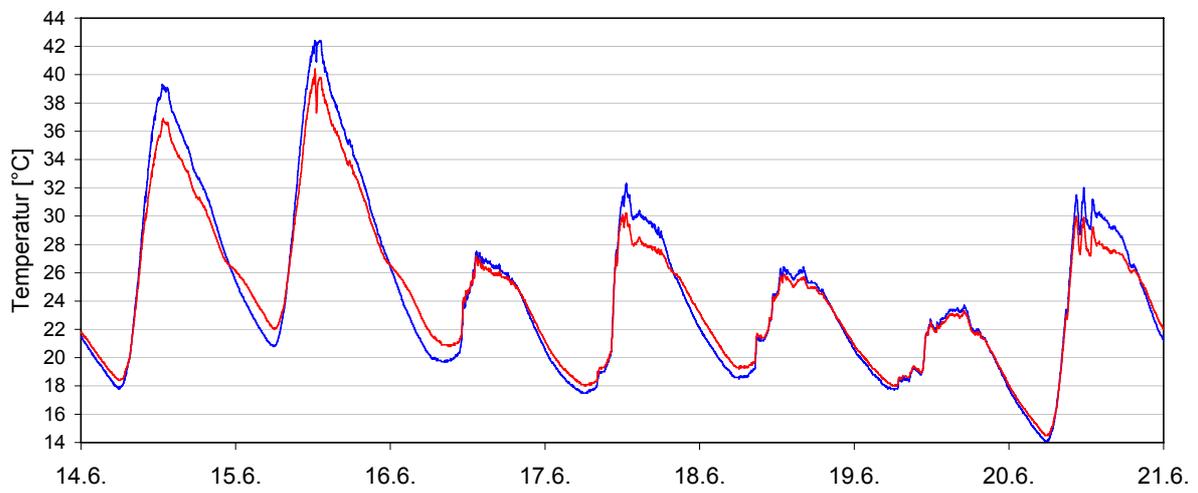


Abb. A10-18: Raumlufttemperaturmessung 1 cm Putz, Kalenderwoche 25 / 2004

Blau: ohne PCM; Rot: mit PCM

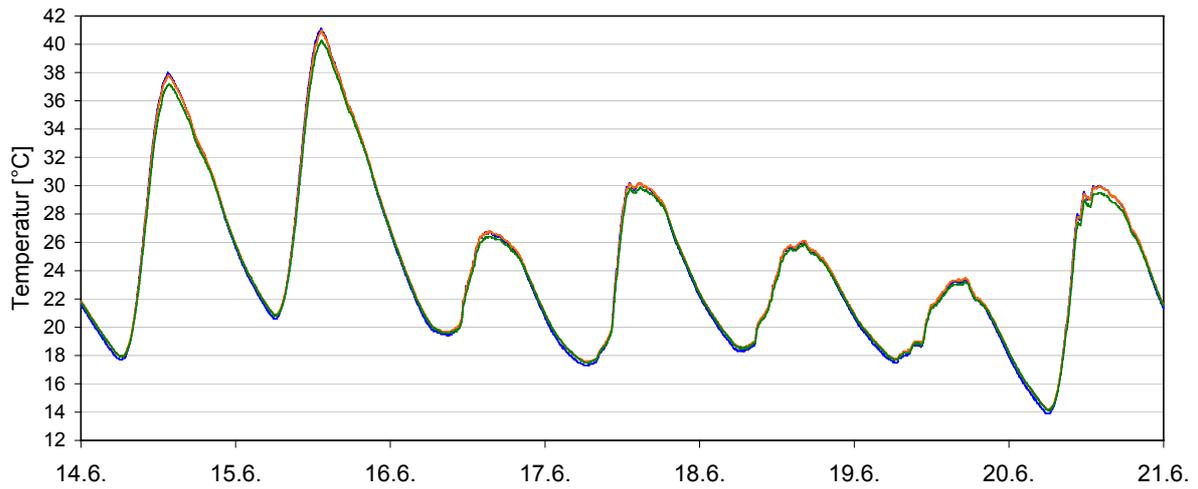


Abb. A10-19: Temperaturprofilmessung Messpunkt 5, 1 cm Gips-Platz, Kalenderwoche 25 / 2004

Blau: Oberfläche; Orange: 0.5 cm; Grün: 1 cm

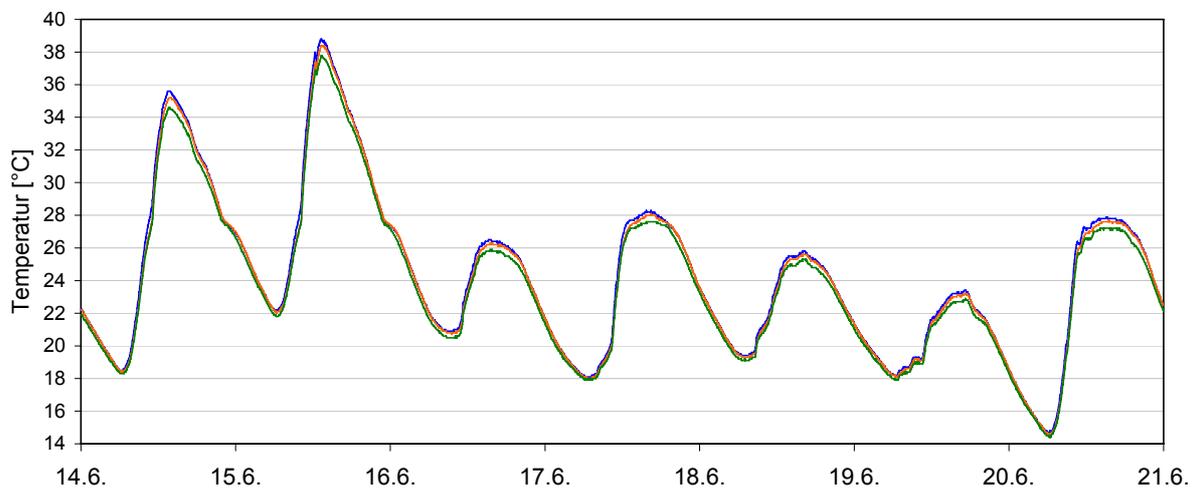


Abb. A10-20: Temperaturprofilmessung Messpunkt 5, 1 cm PCM-Platz, Kalenderwoche 25 / 2004

Blau: Oberfläche; Orange: 0.5 cm; Grün: 1 cm

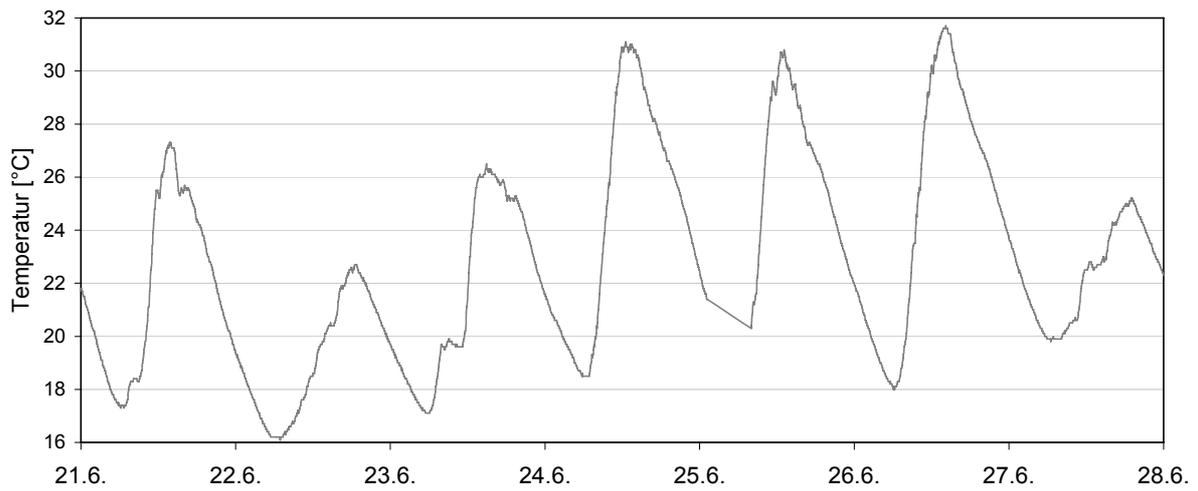


Abb. A10-21: Außenlufttemperaturmessung Kalenderwoche 26 / 2004

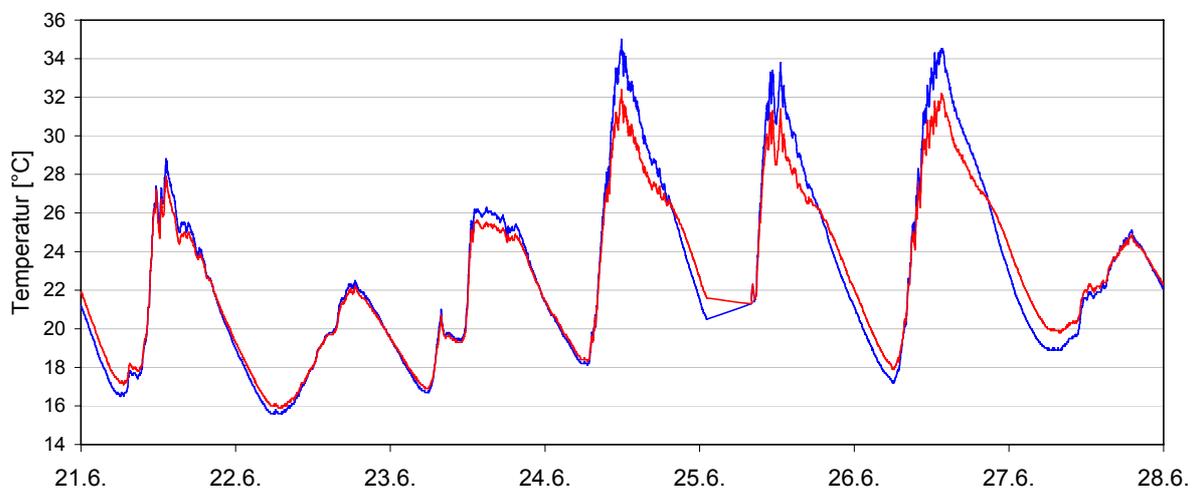


Abb. A10-22: Raumlufttemperaturmessung 1 cm Putz, Kalenderwoche 26 / 2004

Blau: ohne PCM; Rot: mit PCM

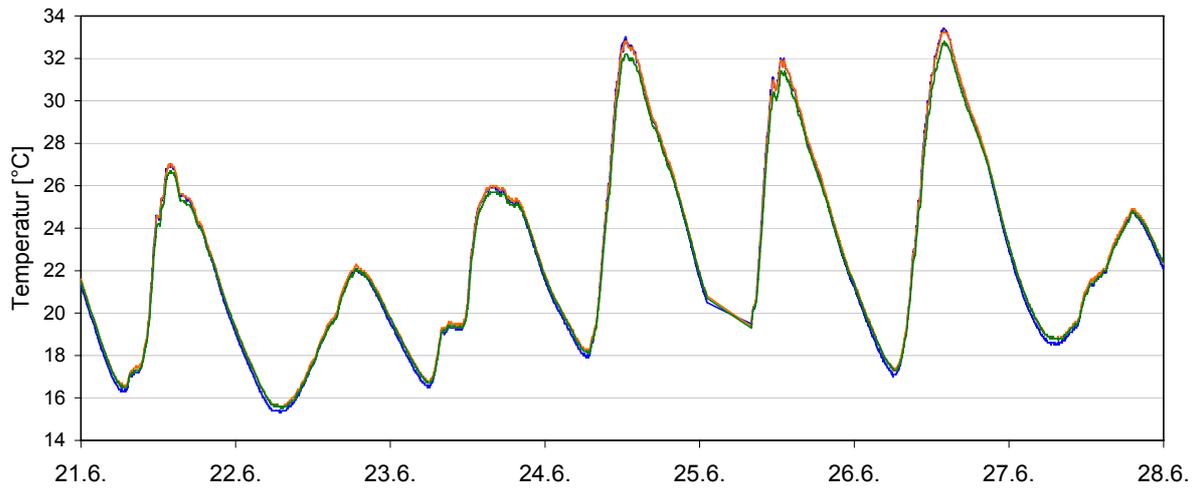


Abb. A10-23: Temperaturprofilmessung Messpunkt 5, 1 cm Gips-Platz, Kalenderwoche 26 / 2004

Blau: Oberfläche; Orange: 0.5 cm; Grün: 1 cm

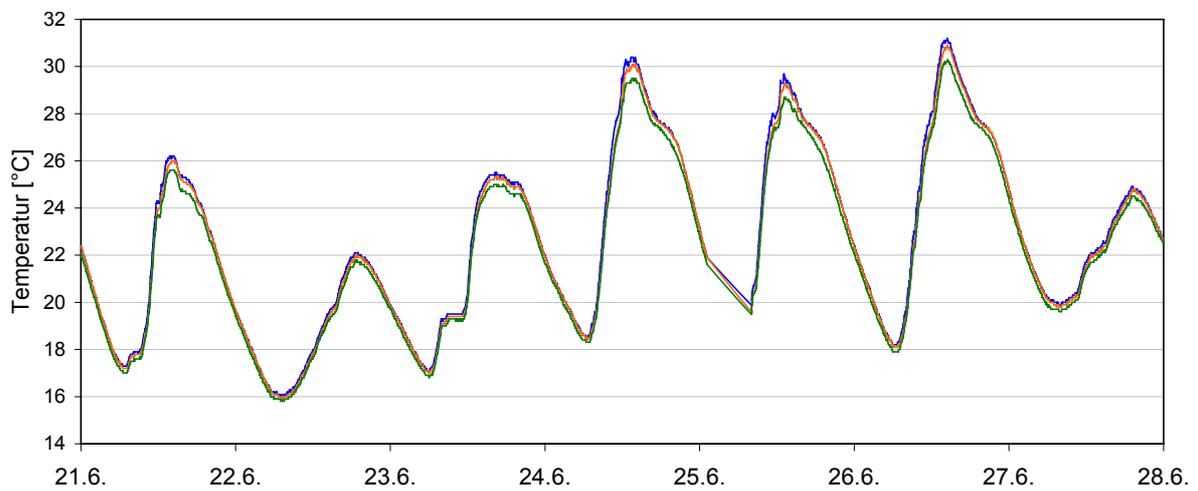


Abb. A10-24: Temperaturprofilmessung Messpunkt 5, 1 cm PCM-Platz, Kalenderwoche 26 / 2004

Blau: Oberfläche; Orange: 0.5 cm; Grün: 1 cm

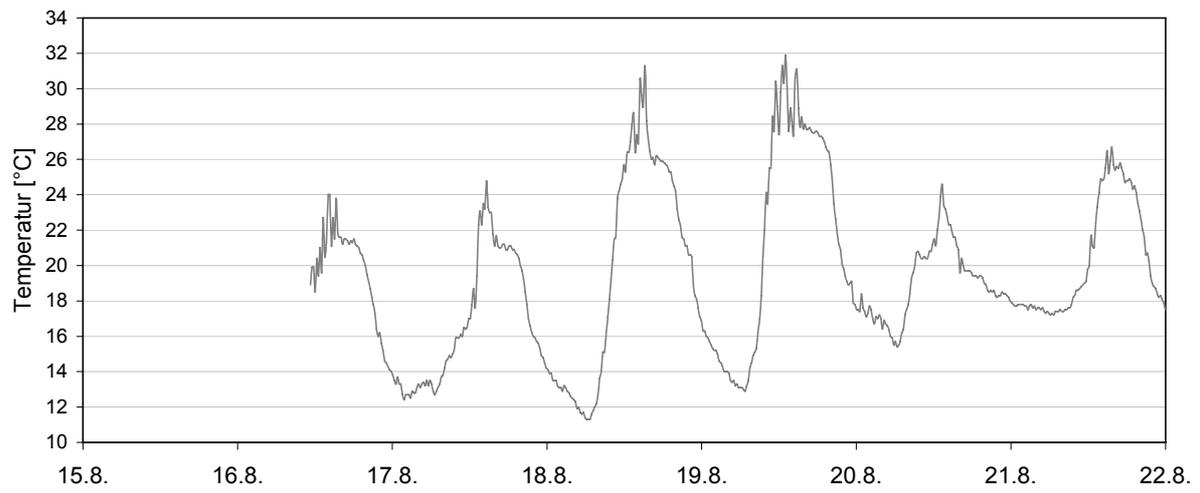


Abb. A10-25: Außenlufttemperaturmessung Kalenderwoche 33 / 2005

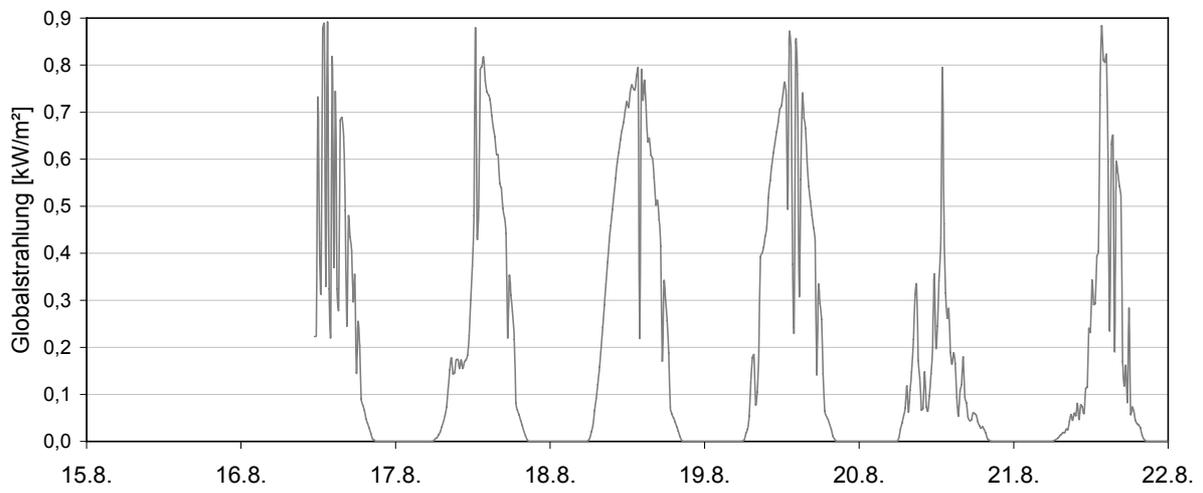


Abb. A10-26: Pyranometermessung: Globalstrahlung, Kalenderwoche 33 / 2005

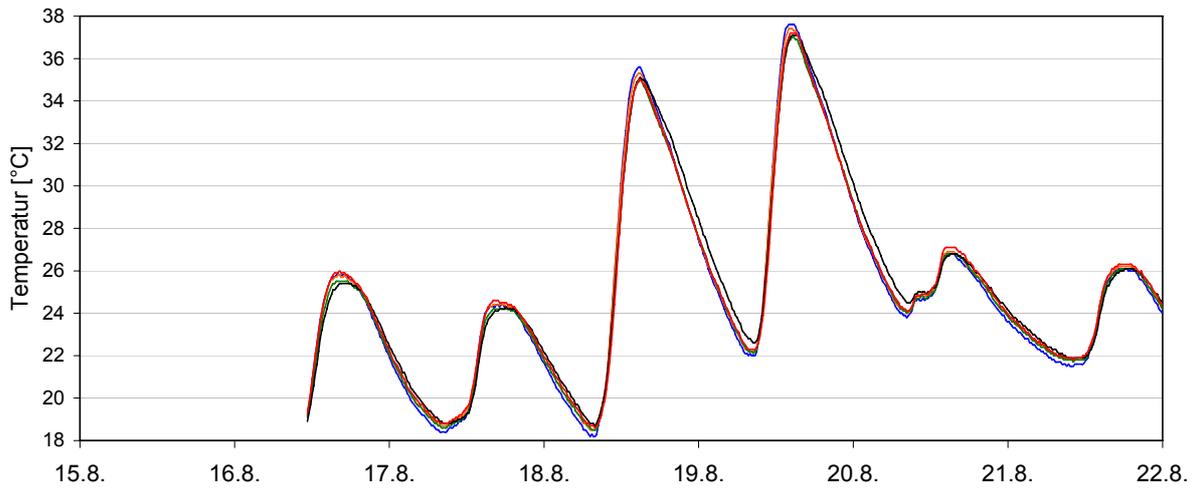


Abb. A10-27: Temperaturprofilmessung Messpunkt 5, 3 cm Gips-Platz, Kalenderwoche 33 / 2005

Rot: Oberfläche; Schwarz: 1 cm; Grün: 2 cm; Orange: 2.5cm; Blau: 3 cm

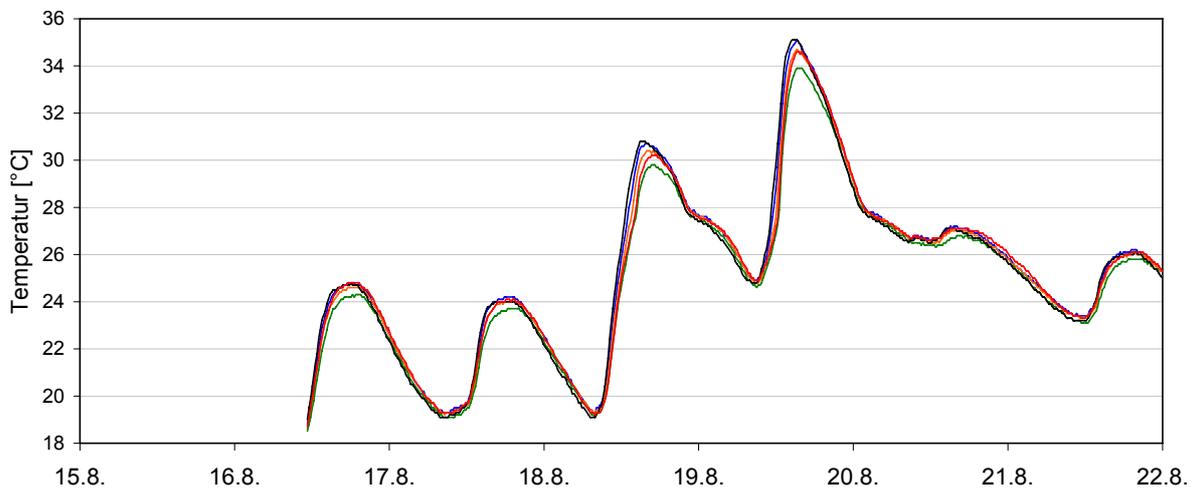


Abb. A10-28: Temperaturprofilmessung Messpunkt 5, 3 cm PCM-Platz, Kalenderwoche 33 / 2005

Rot: Oberfläche; Schwarz: 1 cm; Grün: 2 cm; Orange: 2.5 cm; Blau: 3 cm

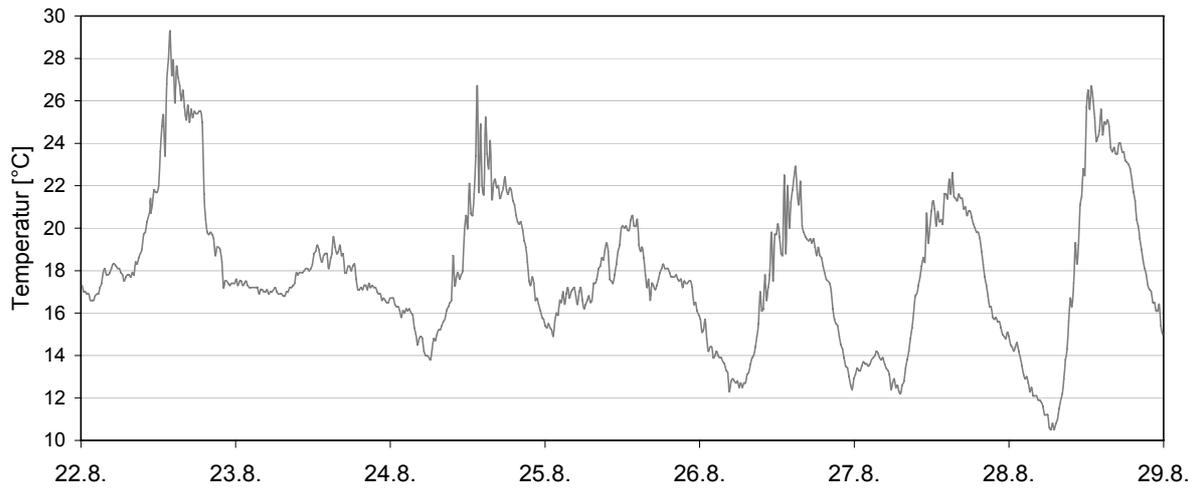


Abb. A10-29: Außenlufttemperaturmessung Kalenderwoche 34 / 2005

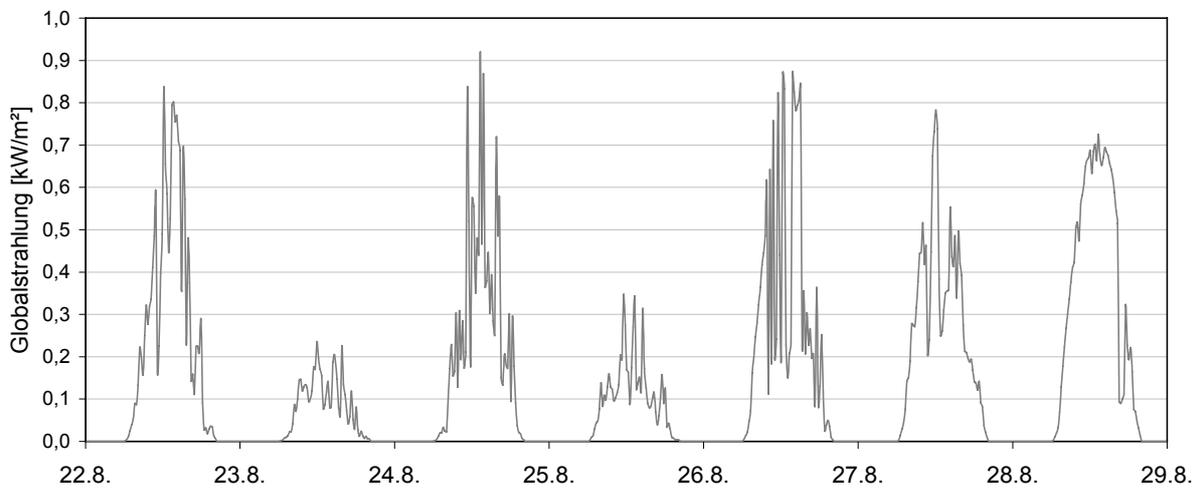


Abb. A10-30: Pyranometermessung: Globalstrahlung, Kalenderwoche 34 / 2005

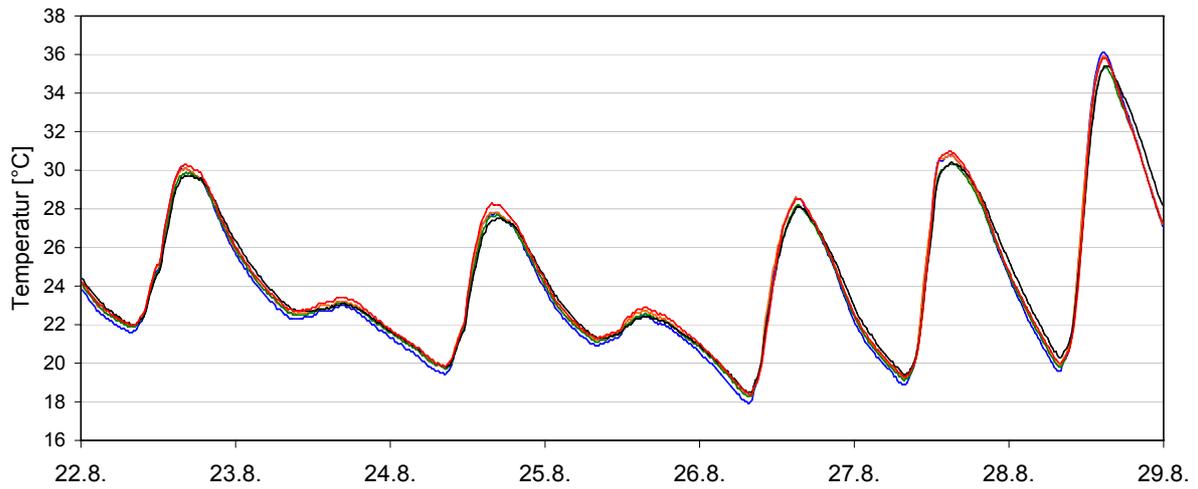


Abb. A10-31: Temperaturprofilmessung Messpunkt 5, 3 cm Gips-Platz, Kalenderwoche 34 / 2005

Rot: Oberfläche; Schwarz: 1 cm; Grün: 2 cm; Orange: 2.5cm; Blau: 3 cm

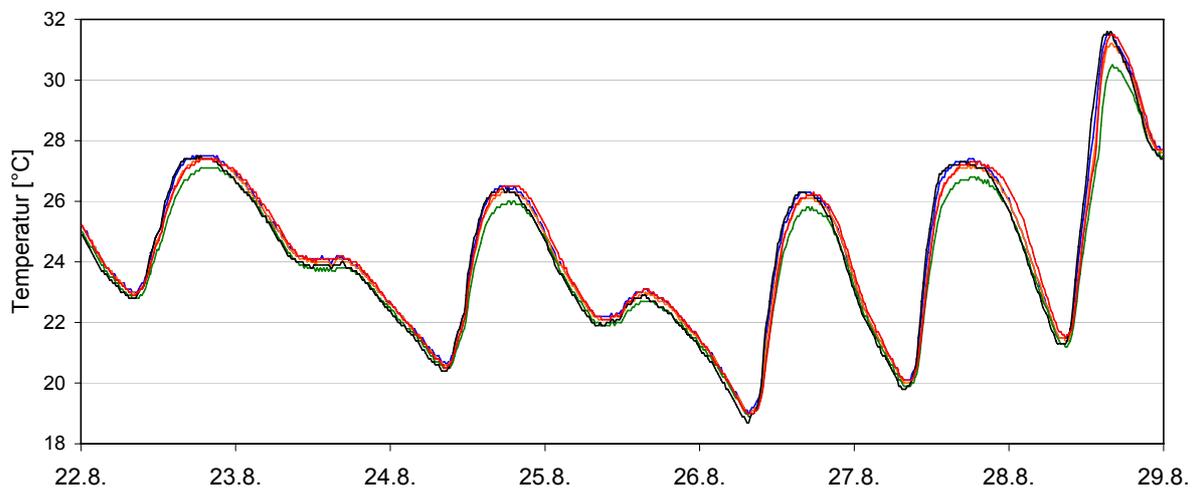


Abb. A10-32: Temperaturprofilmessung Messpunkt 5, 3cm PCM-Platz, Kalenderwoche 34 / 2005

Rot: Oberfläche; Schwarz: 1 cm; Grün: 2 cm; Orange: 2.5cm; Blau: 3 cm

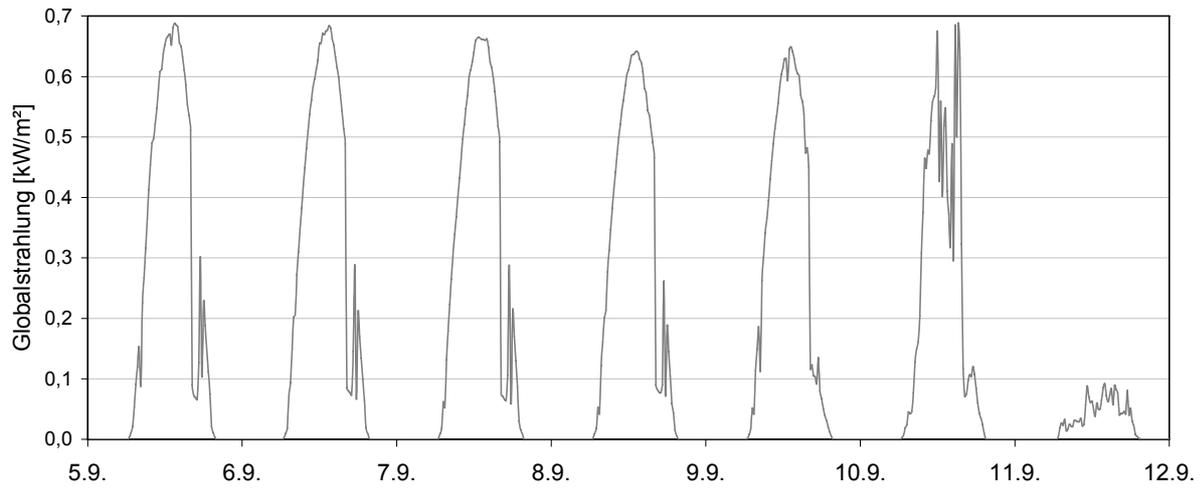


Abb. A10-33: Pyranometermessung: Globalstrahlung, Kalenderwoche 36 / 2005

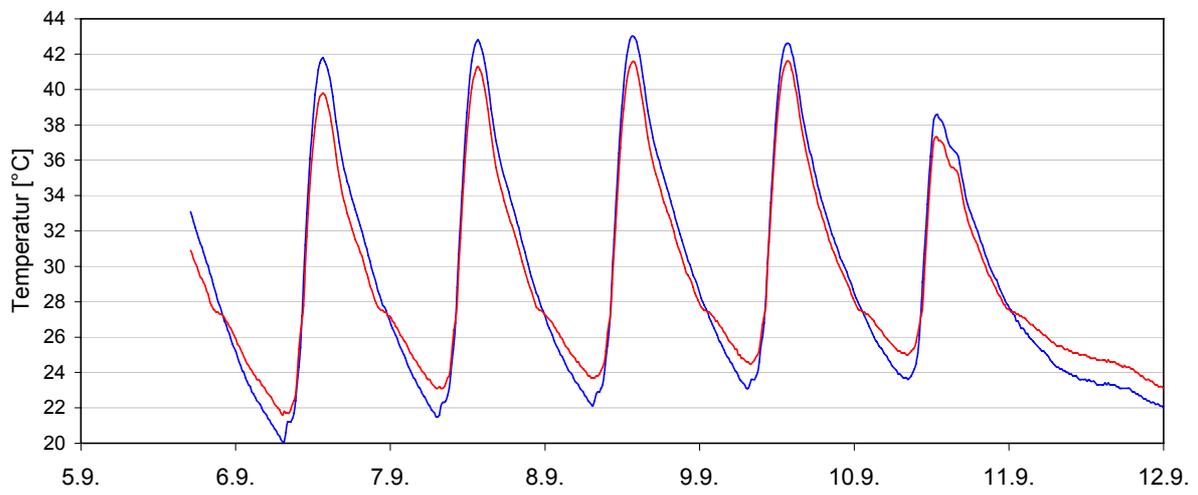


Abb. A10-34: Raumlufitemperaturmessung 3cm Putz, Kalenderwoche 36 / 2005

Blau: ohne PCM; Rot: mit PCM

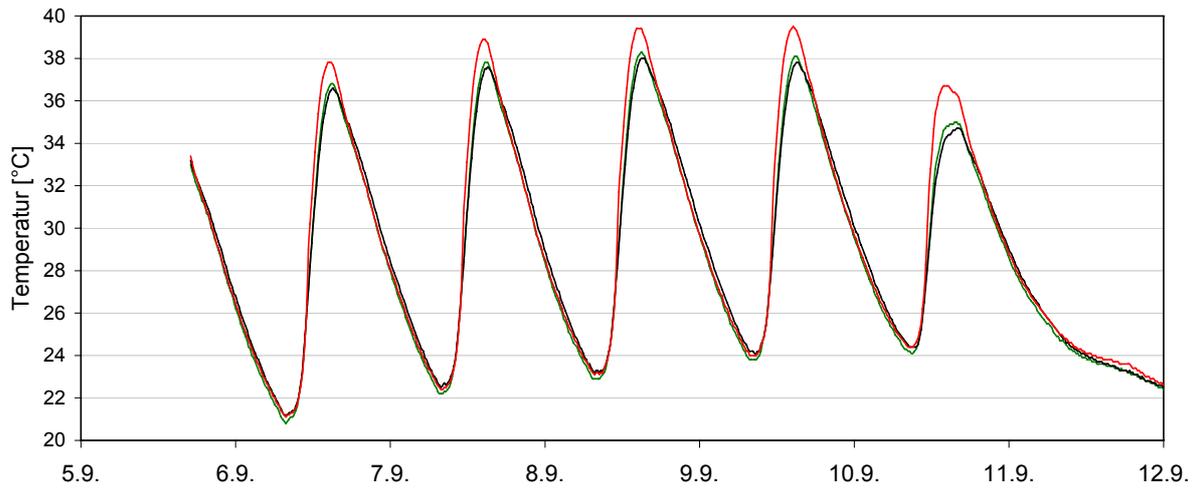


Abb. A10-35: Temperaturprofilmessung Messpunkt 5, 3 cm Gips-Platz, Kalenderwoche 36 / 2005

Rot: Oberfläche; Schwarz: 1 cm; Grün: 2 cm; Orange: 2.5 cm; Blau: 3 cm

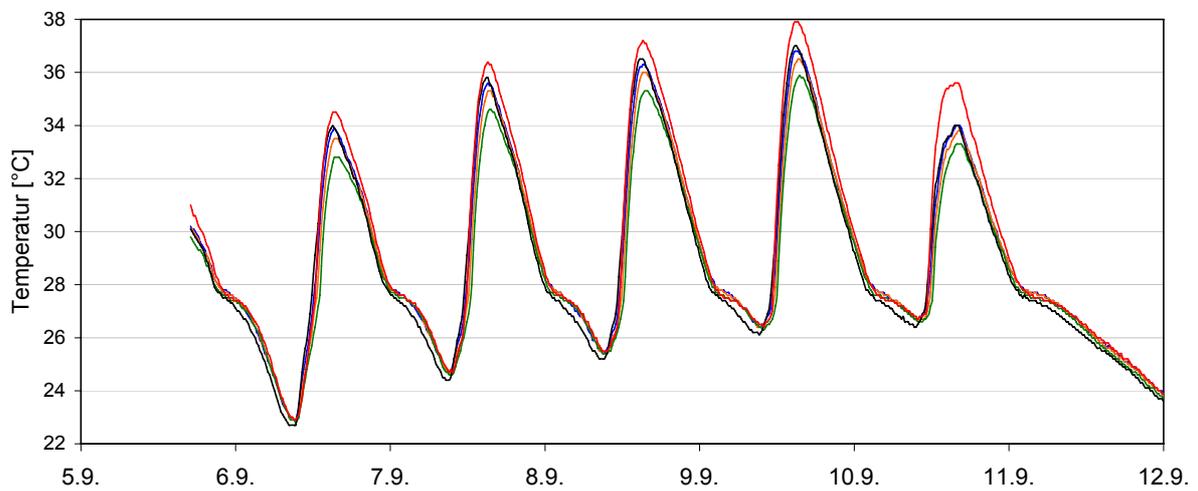


Abb. A10-36: Temperaturprofilmessung Messpunkt 5, 3 cm PCM-Platz, Kalenderwoche 36 / 2005

Rot: Oberfläche; Schwarz: 1 cm; Grün: 2 cm; Orange: 2.5 cm; Blau: 3 cm

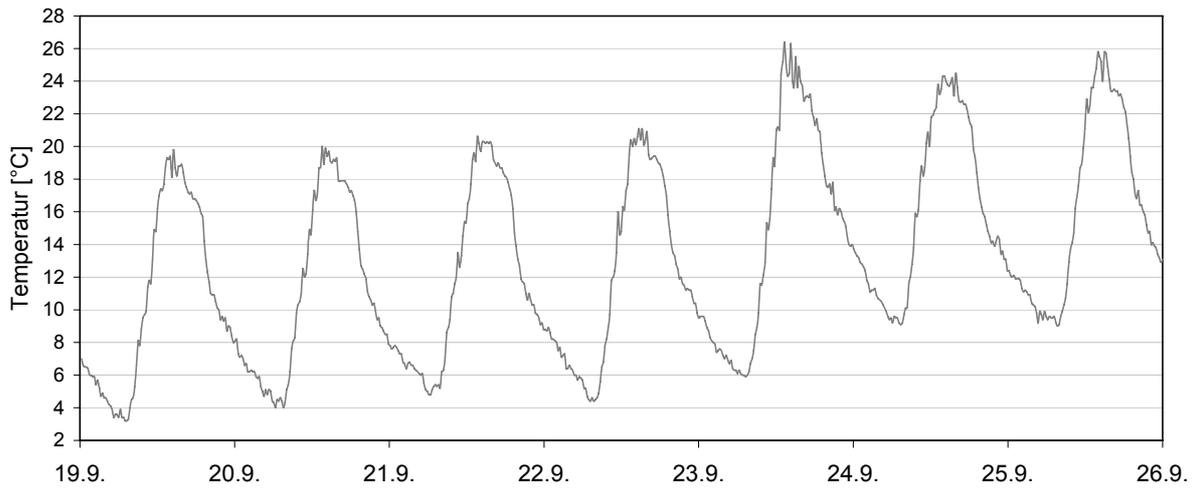


Abb. A10-37: Außenlufttemperaturmessung Kalenderwoche 38 / 2005

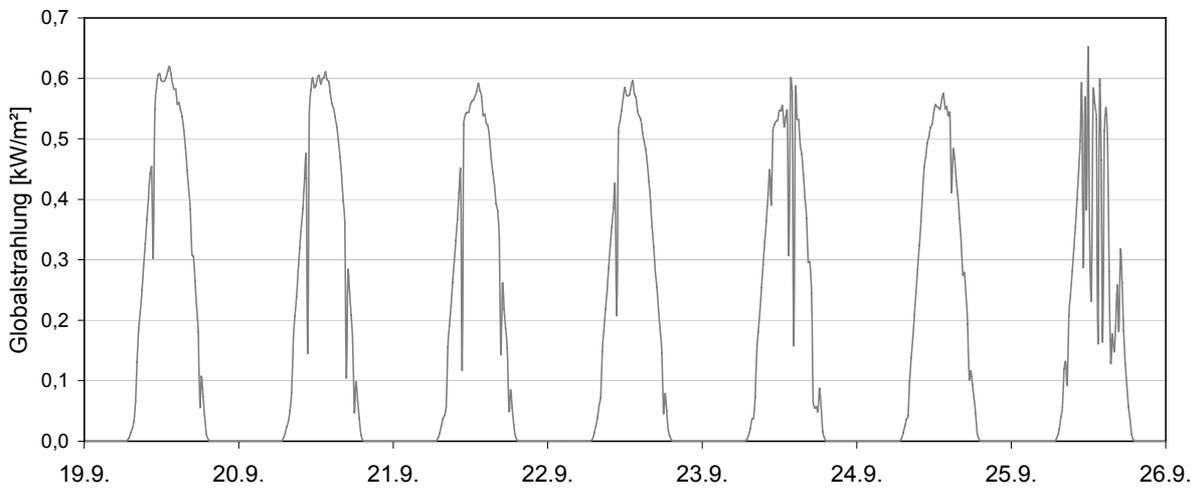


Abb. A10-38: Pyranometermessung: Globalstrahlung, Kalenderwoche 38 / 2005

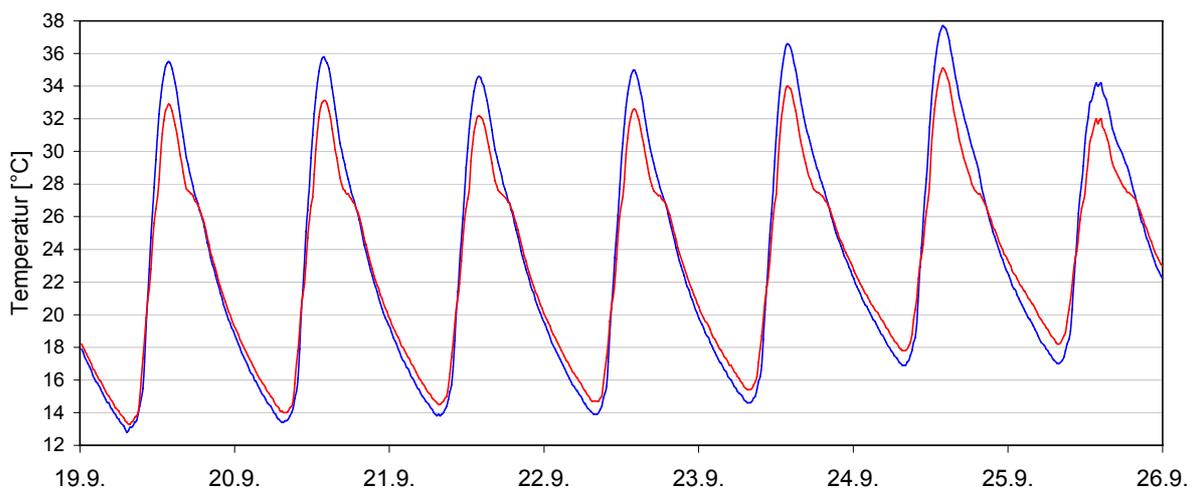


Abb. A10-39: Raumlufthtemperaturmessung 3 cm Putz, Kalenderwoche 38 / 2005

Blau: ohne PCM; Rot: mit PCM

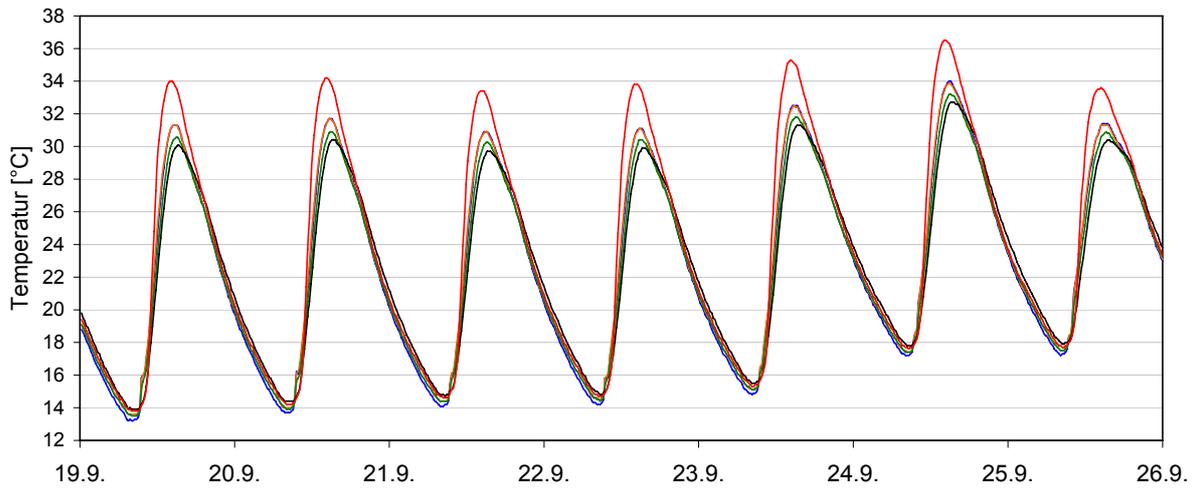


Abb. A10-40: Temperaturprofilmessung Messpunkt 5, 3 cm Gips-Putz, Kalenderwoche 38 / 2005

Rot: Oberfläche; Schwarz: 1 cm; Grün: 2 cm; Orange: 2.5 cm; Blau: 3 cm

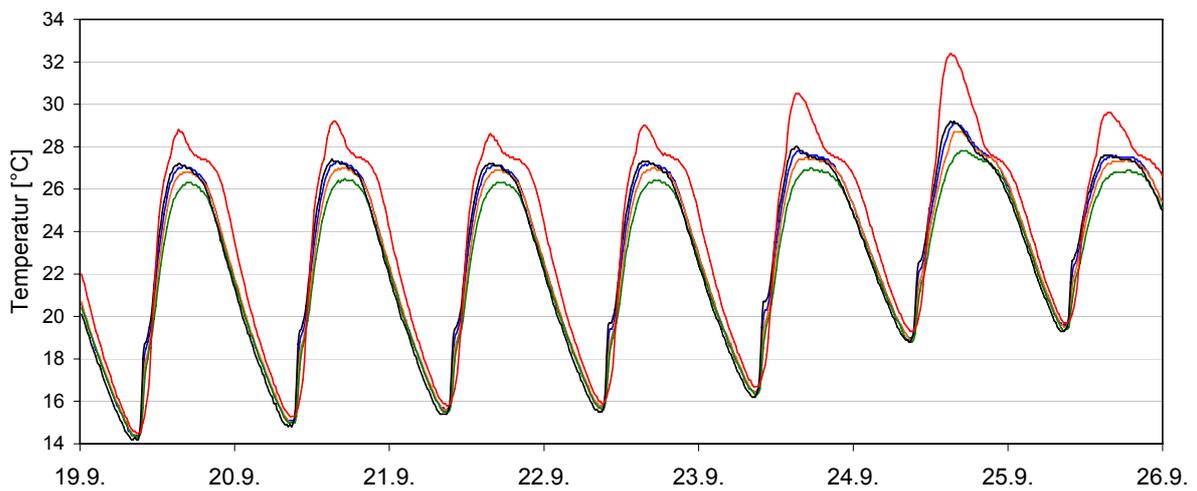


Abb. A10-41: Temperaturprofilmessung Messpunkt 5, 3cm PCM-Putz, Kalenderwoche 38 / 2005

Rot: Oberfläche; Schwarz: 1cm; Grün: 2cm; Orange: 2,5cm; Blau: 3cm

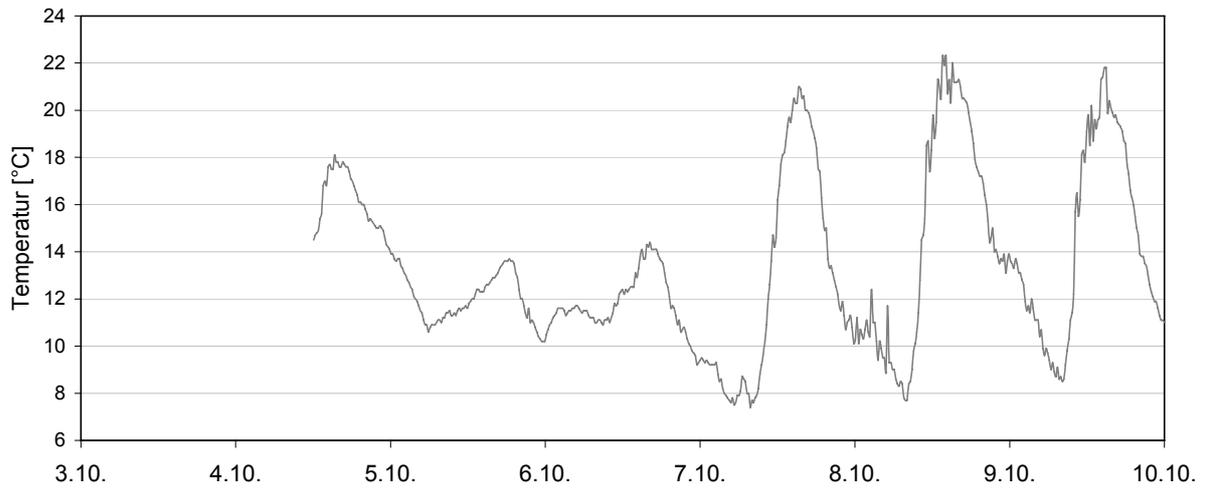


Abb. A10-42: Außenlufttemperaturmessung Kalenderwoche 40 / 2005

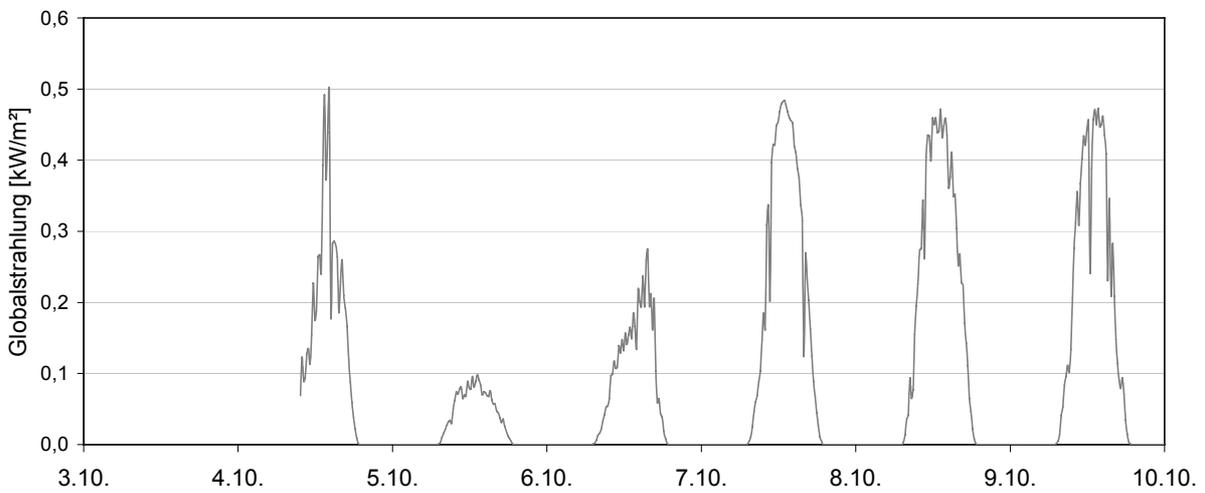


Abb. A10-43: Pyranometermessung: Globalstrahlung, Kalenderwoche 40 / 2005

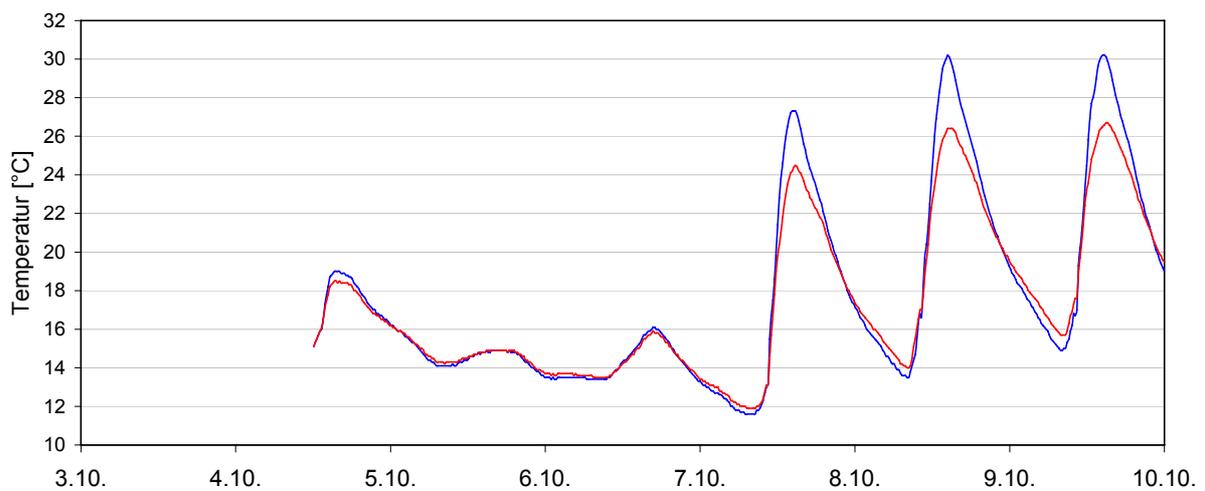


Abb. A10-44: Raumlufttemperaturmessung 3 cm Putz, Kalenderwoche 40 / 2005

Blau: ohne PCM; Rot: mit PCM

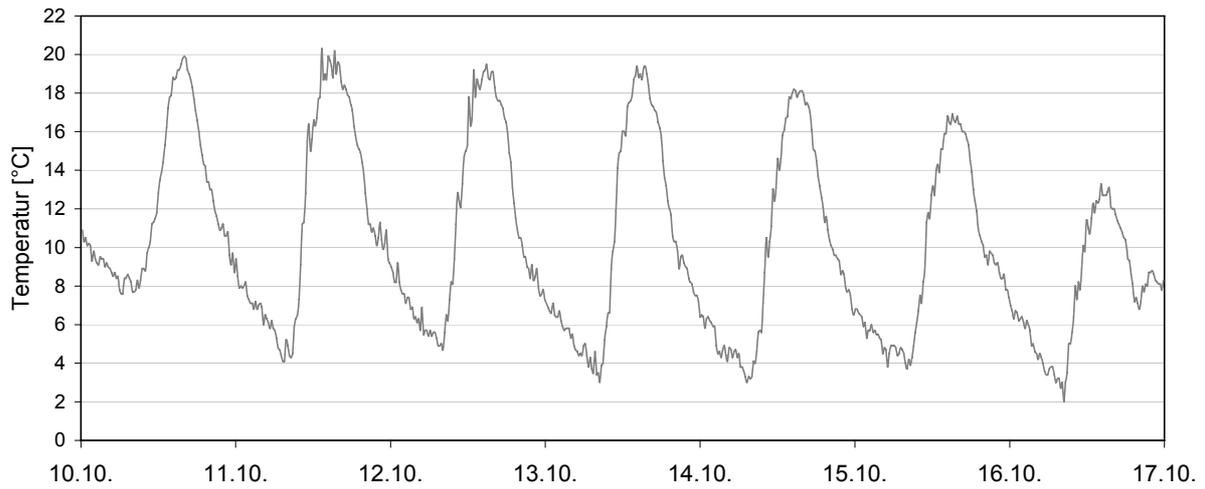


Abb. A10-45: Außenlufttemperaturmessung Kalenderwoche 41 / 2005

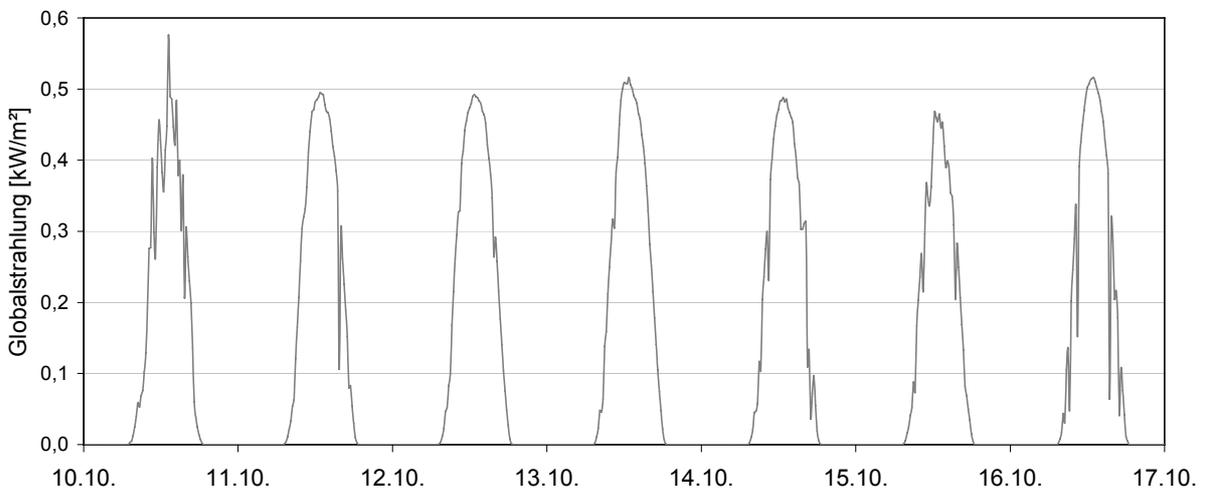


Abb. A10-46: Pyranometermessung: Globalstrahlung, Kalenderwoche 41 / 2005

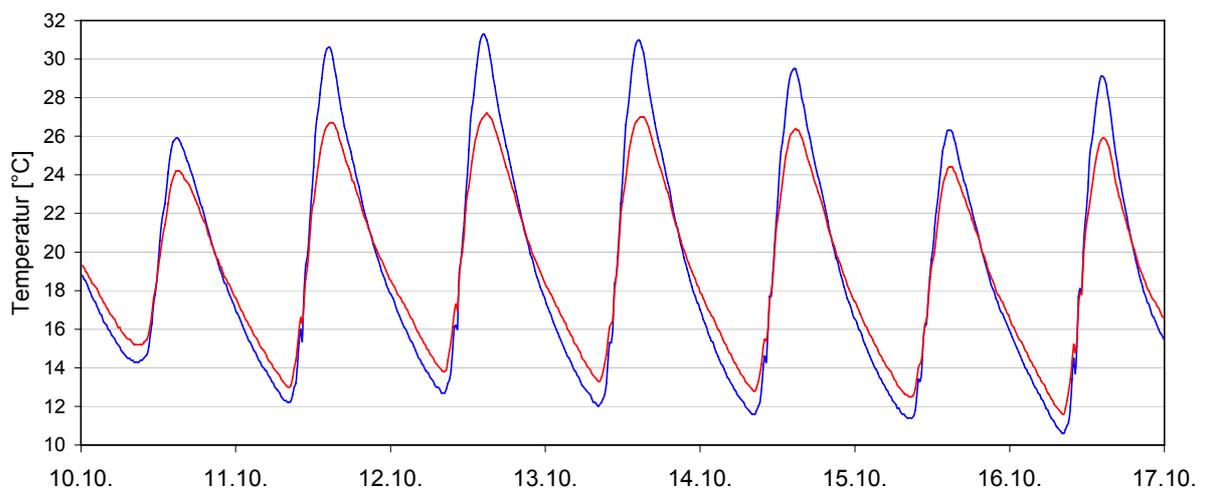


Abb. A10-47: Raumlufttemperaturmessung 3 cm Putz, Kalenderwoche 41 / 2005

Blau: ohne PCM; Rot: mit PCM

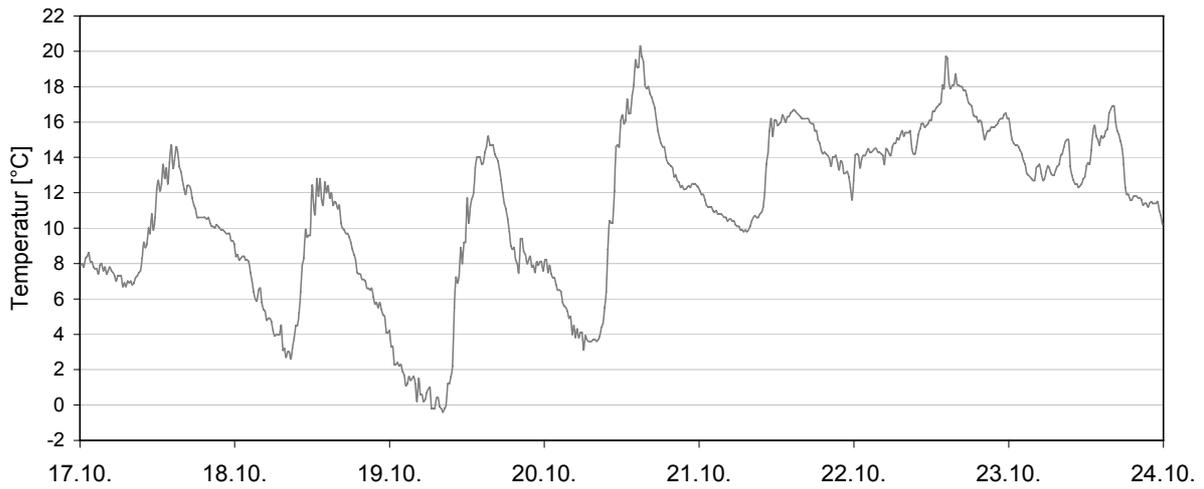


Abb. A10-48: Außenlufttemperaturmessung Kalenderwoche 42 / 2005

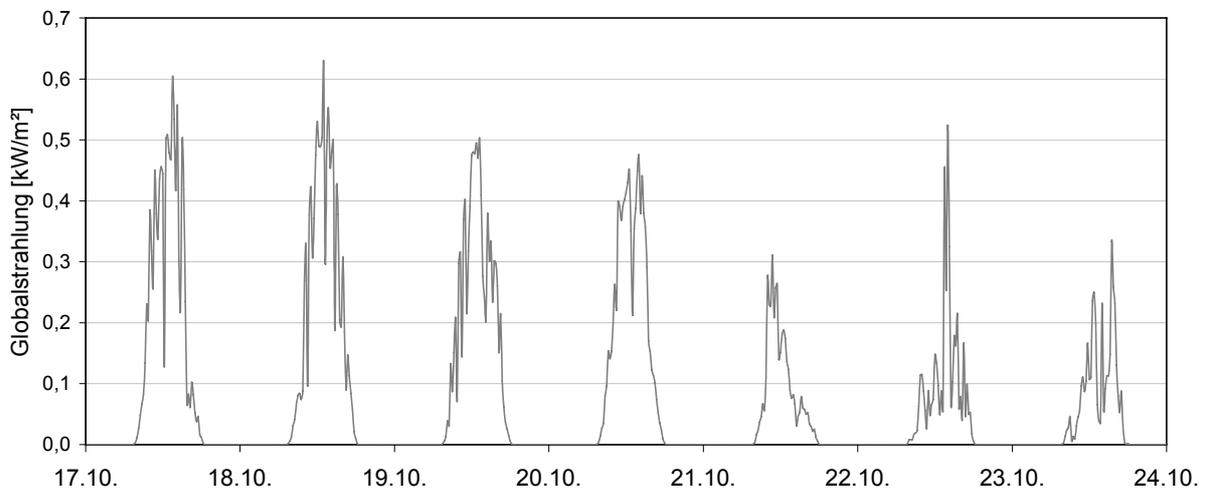


Abb. A10-49: Pyranometermessung: Globalstrahlung, Kalenderwoche 42 / 2005

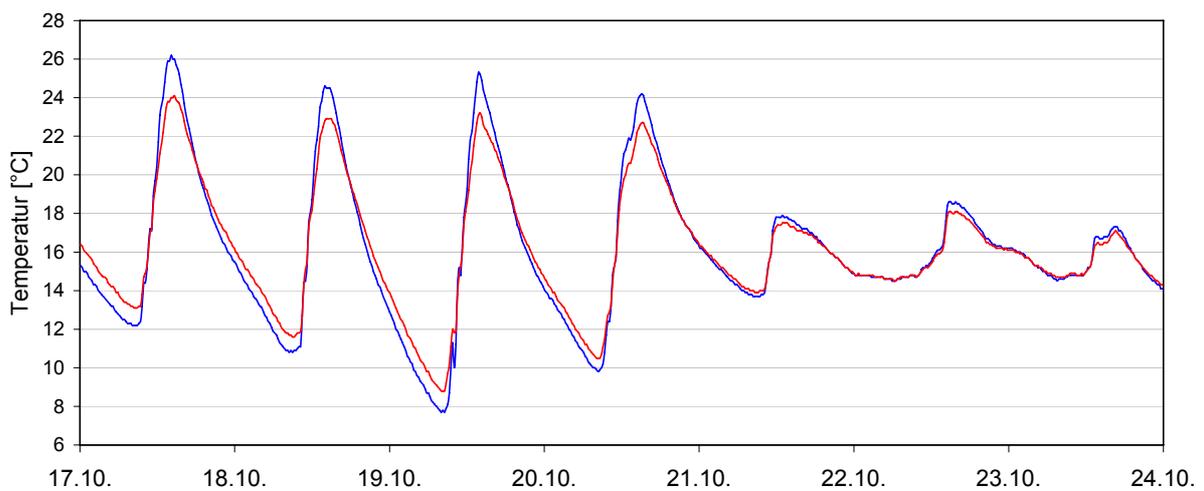


Abb. A10-50: Raumlufttemperaturmessung 3 cm Putz, Kalenderwoche 42 / 2005

Blau: ohne PCM; Rot: mit PCM

ANHANG 11

Maximal-, Minimal-, Mitteltemperaturen und mittlere tägliche Globalstrahlung der in der Simulation verwendeten Klimadatenätze

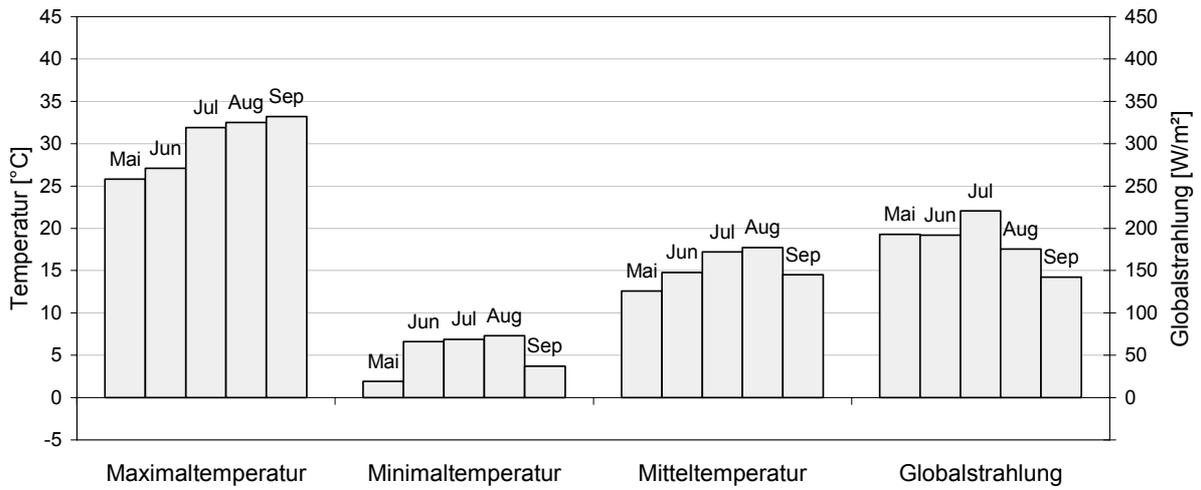


Abb. A11-1: Klimadatenatz Nr. 1, Testreferenzjahr 4, DWD

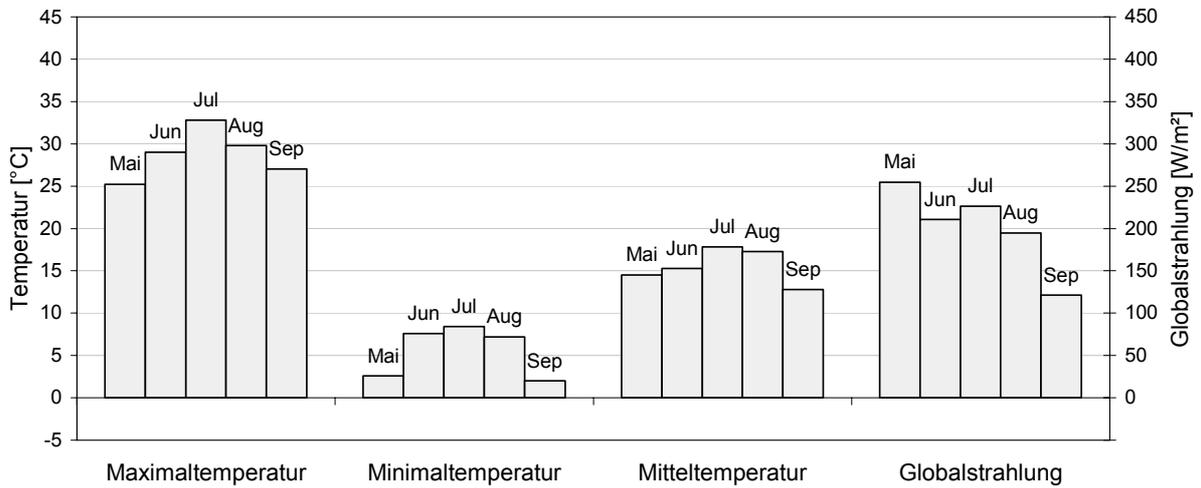


Abb. A11-2: Klimadatenatz Nr. 2, Testreferenzjahr 13, DWD

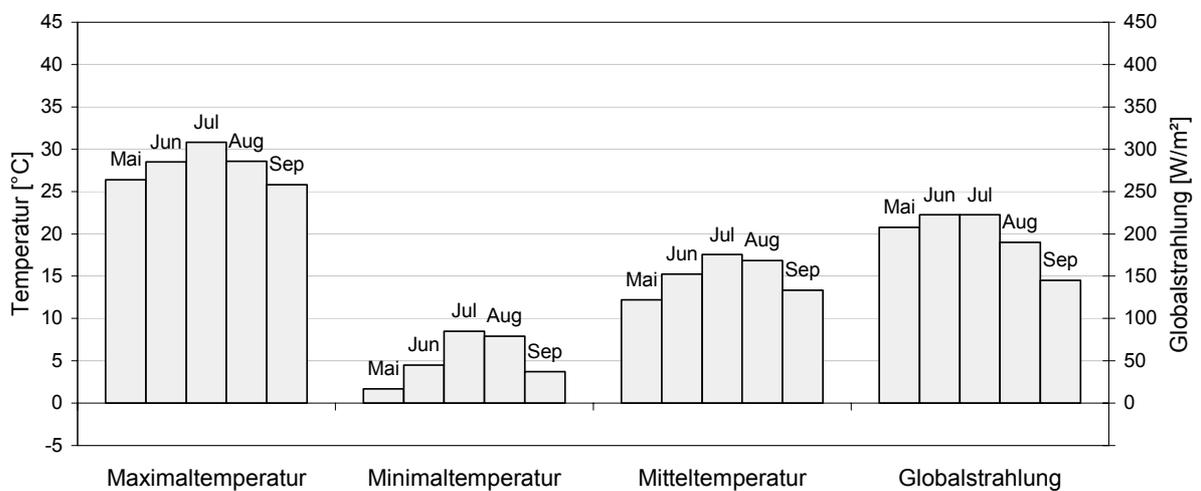


Abb. A11-3: Klimadatenatz Nr. 3, Klimadatenatz Meteorologie Norm für München

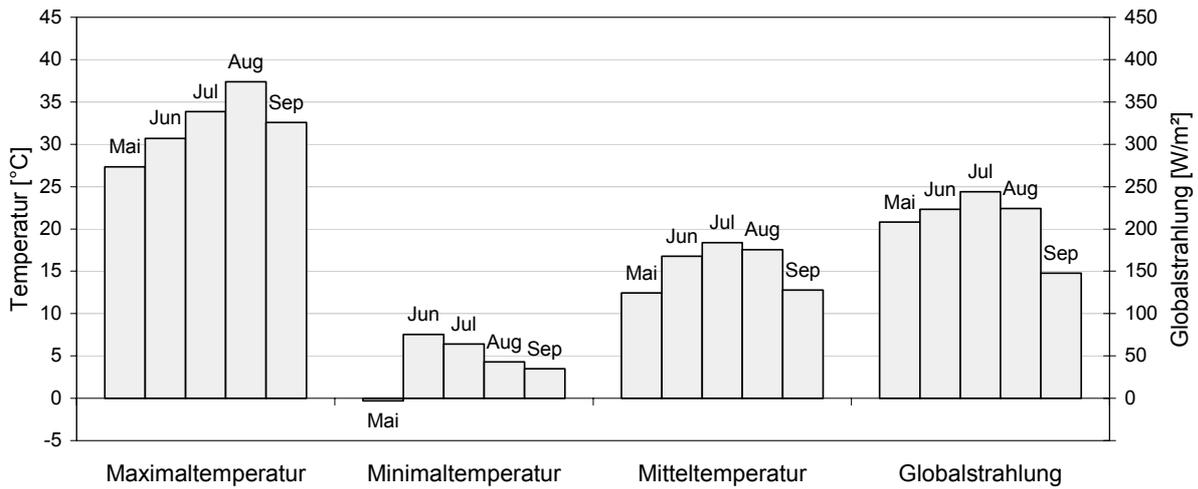


Abb. A11-4: Klimadatenatz Nr. 4, HadRM3 Datensatz für Weimar [107], repräsentierter Zeitraum: 1960 – 1990

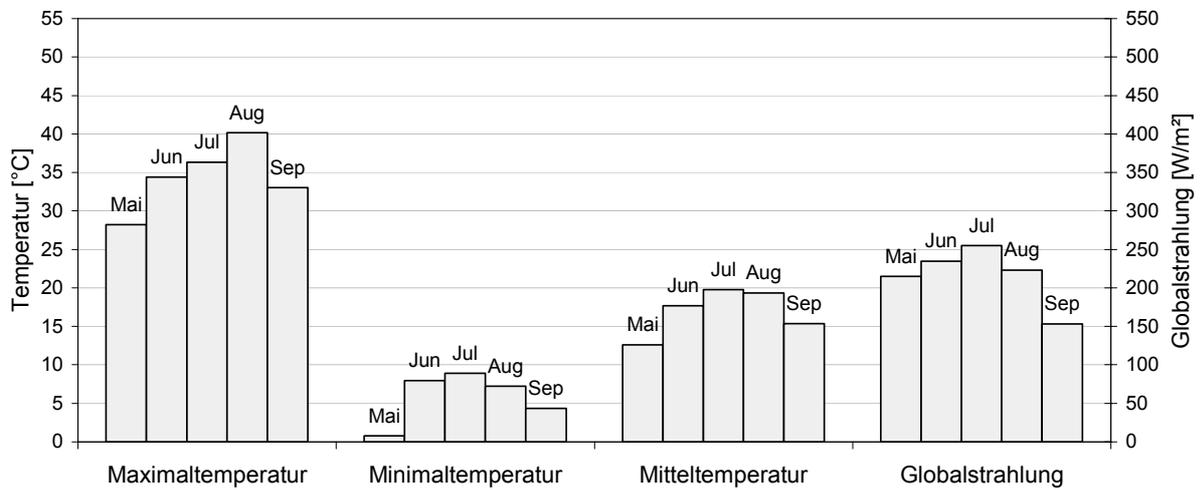


Abb. A11-5: Klimadatenatz Nr. 5, HadRM3 Datensatz für Weimar [107], repräsentierter Zeitraum: 2010 – 2040

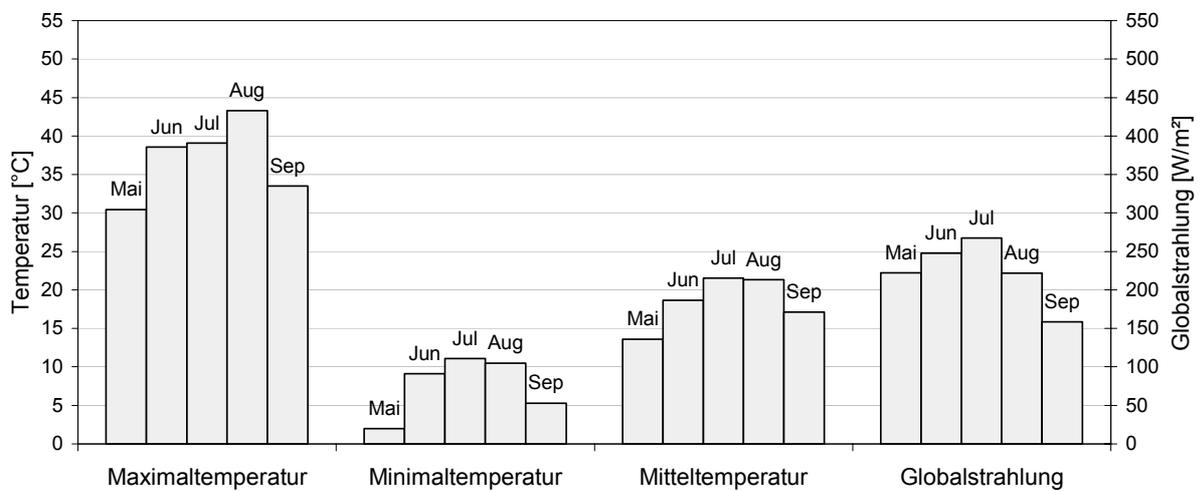


Abb. A11-6: Klimadatenatz Nr. 6, HadRM3 Datensatz für Weimar [107], repräsentierter Zeitraum: 2041 – 2070

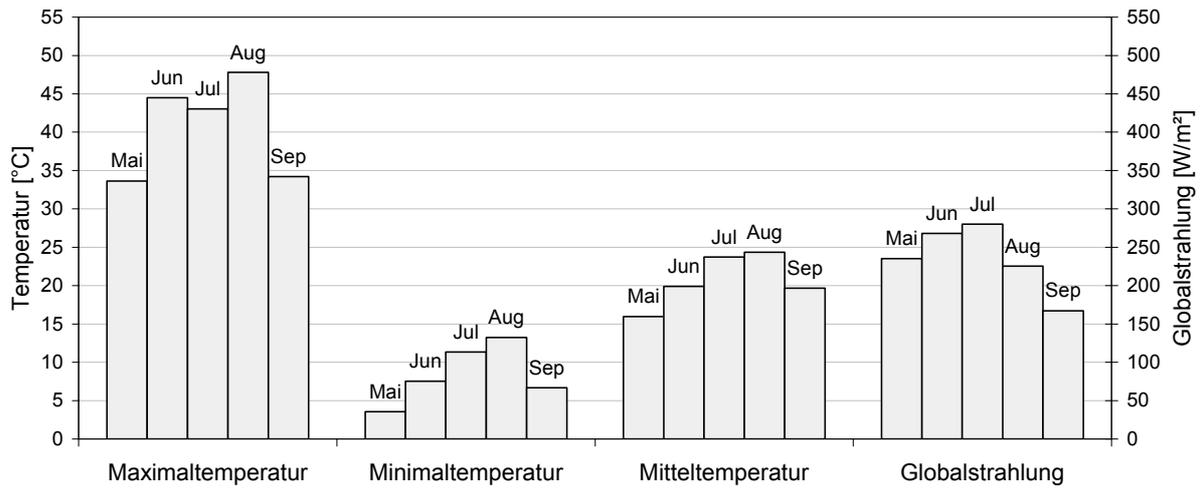


Abb. A11-7: Klimadatensatz Nr. 7, HadRM3 Datensatz für Weimar [107], repräsentierter Zeitraum: 2071 – 2100

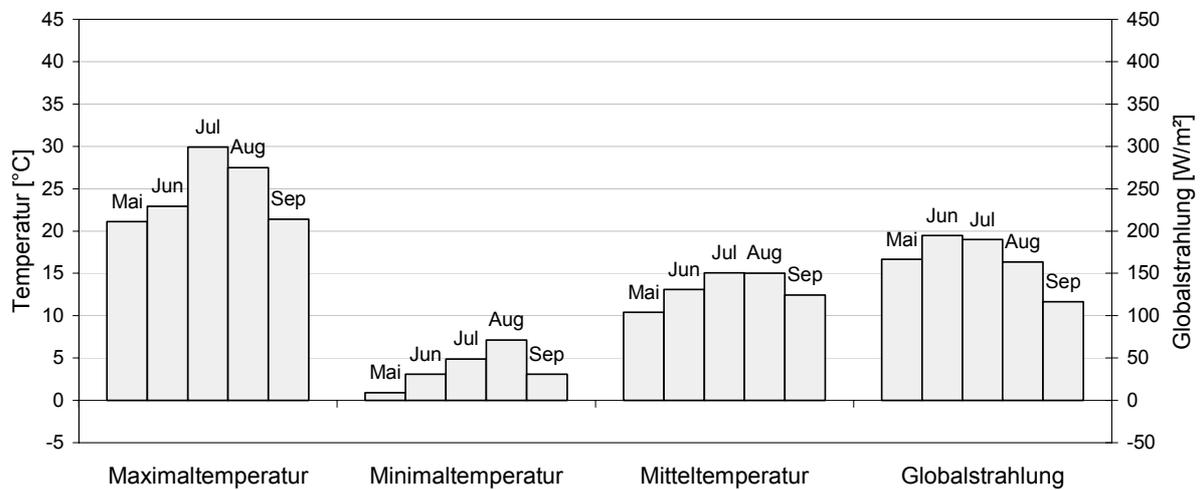


Abb. A11-8: Klimadatensatz Nr. 8, HadRM3 Datensatz für Manchester [107], repräsentierter Zeitraum: 1960 – 1990

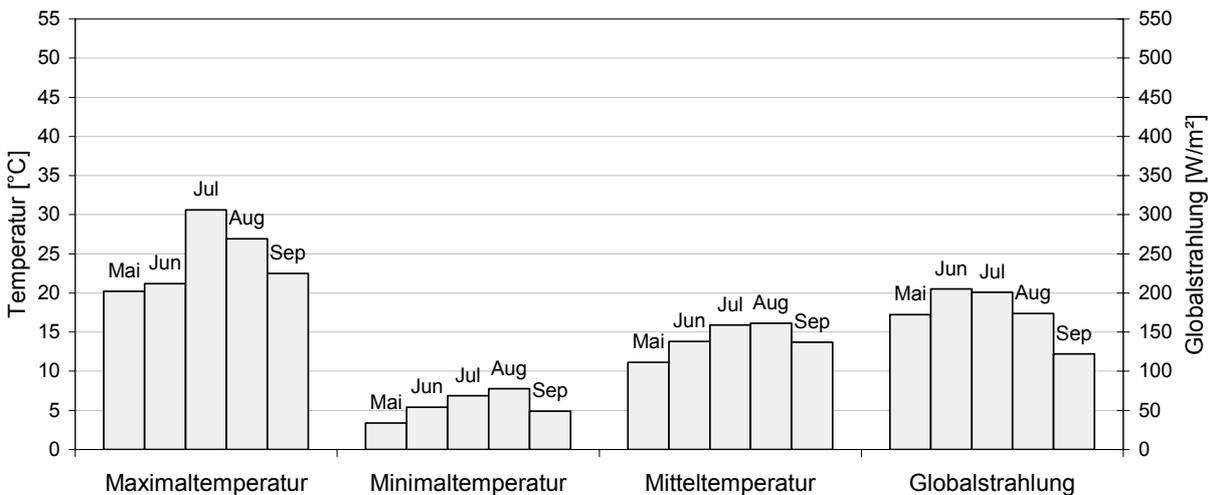


Abb. A11-9: Klimadatensatz Nr. 9, HadRM3 Datensatz für Manchester [107], repräsentierter Zeitraum: 2010 – 2040

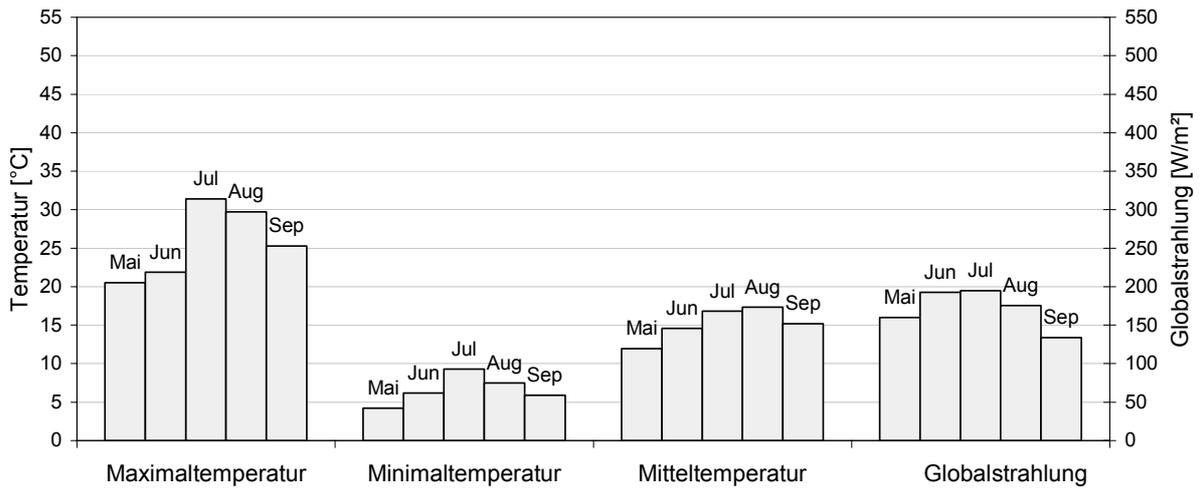


Abb. A11-10: Klimadatensatz Nr. 10, HadRM3 Datensatz für Manchester [107], repräsentierter Zeitraum: 2041 – 2070

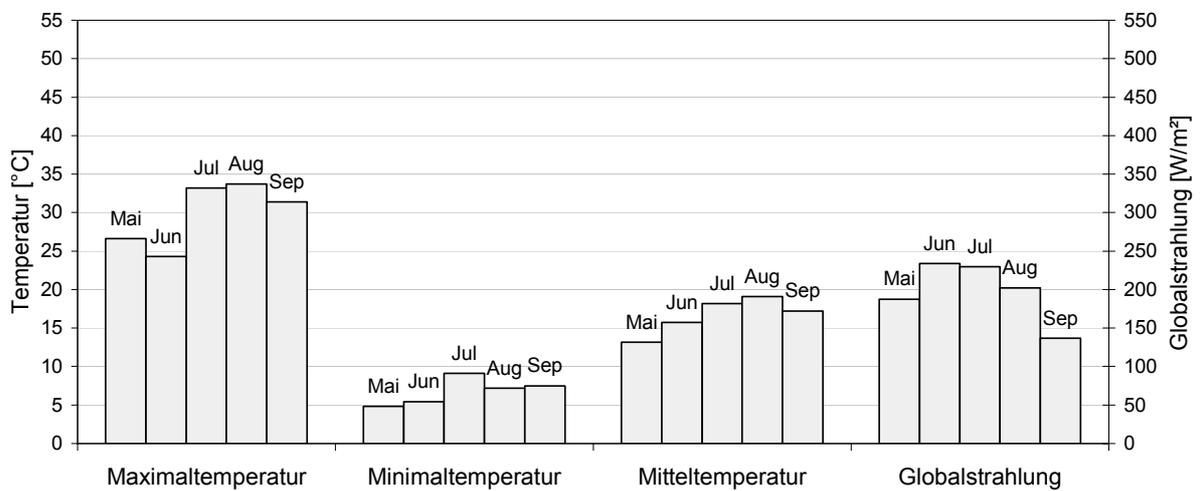


Abb. A11-11: Klimadatensatz Nr. 11, HadRM3 Datensatz für Manchester [107], repräsentierter Zeitraum: 2071 – 2100

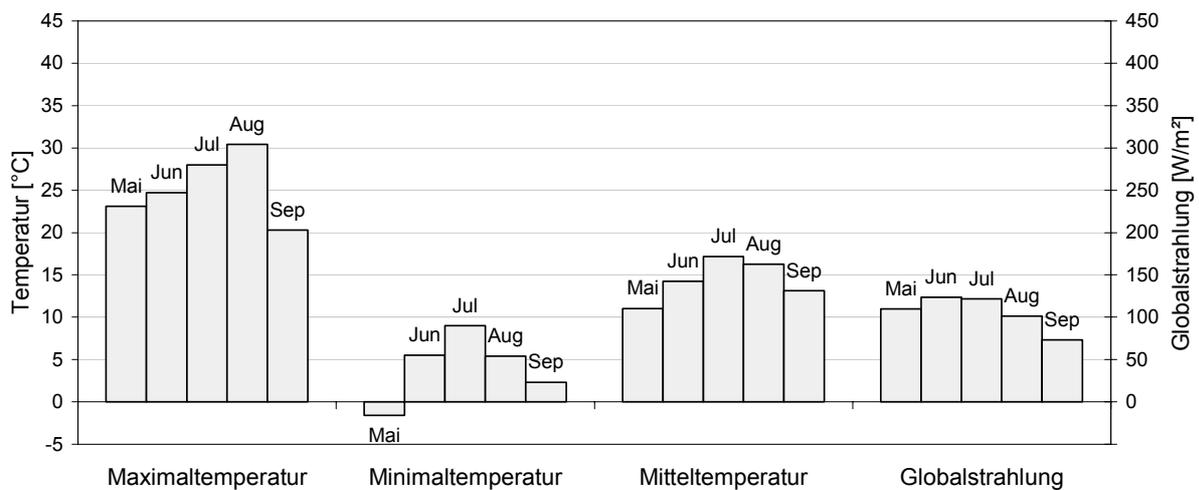


Abb. A11-12: Klimadatensatz von Birmingham (Quelle: ESP-r Distribution)

ANHANG 12

VDI 2078 Tabelle 3. Typ-Räume

Raumtyp XL „sehr leicht“

Bauart	Aufbau	Dicke [m]	λ [W/(mK)]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]
Decke und Fußboden	Teppich	0,0045	0,072	-	-
	Filzmatte	0,005	0,047	78	880
	Stahlbeton	0,10	2,035	2100	920
	Luftschicht	-	R=0,13m ² K/W	-	-
	Mineralwollmatte	0,020	0,047	30	840
	Deckenplatte	0,020	0,05	35	1680
Innenwände	Stahlblech	0,001	58,0	7800	480
	Silan-Matte	0,078	0,047	60	840
	Stahlblech	0,001	58,0	7800	480
Innentür	Tischlerplatte	0,040	0,14	500	2520
Außenwand	Corten-Stahl	0,0015	58,0	7800	480
	Dämmung	0,071	0,047	60	1680
	Stahlblech	0,001	58,0	7800	480

Raumtyp L „leicht“

Decke und Fußboden	Estrich	0,03	1,40	2200	1050
	Steinwolle	0,02	0,0047	75	840
	Beton	0,12	20,35	2100	920
	Luftschicht	-	R=0,13m ² K/W	-	-
	Steinwolle	0,02	0,047	75	840
	Metalldecke	0,001	58,0	7800	480
Innenwände	Porenbeton	0,12	0,40	1200	1050
Innentür	Tischlerplatte	0,04	0,14	500	2520
Außenwand	Brettschalung	0,01	0,14	500	2520
	Dämmung	0,064	0,047	75	840
	Brettschalung	0,01	0,14	500	2520

Raumtyp M „mittel“

Decke und Fußboden	Beton	0,12	2,035	2100	920
	Luftschicht	-	R=0,13m ² K/W	-	-
	Steinwolle	0,02	0,047	75	840
	Metalldecke	0,001	58,0	7800	480
Innenwände	Porenbeton	0,12	0,40	1200	1050
Innentür	Tischlerplatte	0,04	0,14	500	2520
Außenwand	Beton	0,10	2,035	2100	920
	Dämmung	0,060	0,047	75	840
	Luftschicht	-	R=0,13m ² K/W	-	-
	Fassadenplatte	0,025	0,45	1300	1050

Raumtyp S „schwer“

Decke und Fußboden	PVC-Belag	0,002	0,21	1300	1470
	Estrich	0,045	1,40	2200	1050
	Steinwolle	0,012	0,06	50	840
	Beton	0,15	2,035	2400	1050
Innenwände	Hohlblocksteine	0,24	0,56	1300	1050
Innentür	Buche, massiv	0,040	0,21	700	2520
Außenwand	Beton	0,24	2,035	2100	920
	Dämmung	0,062	0,047	75	840
	Fassadenplatte	0,025	0,45	1300	1050

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Weitere Personen waren an der inhaltlich-materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder anderer Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich versichere ehrenwörtlich, dass ich nach bestem Wissen die reine Wahrheit gesagt und nichts verschwiegen habe.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Sabina Hofma', with a long horizontal stroke extending to the right.

Weimar, September 2006

Lebenslauf

Sabine Hoffmann

geb. am 29.08.1972 in Illertissen

seit 2002	wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Bauhaus-Universität Weimar
2003 - 2005	Aufbaustudium „Management für Bau, Immobilien, Infrastruktur“ an der Bauhaus-Universität Weimar, Master of Science
2001 - 2002	INSA Rennes, Frankreich (Diplomarbeit)
1999 - 2000	Ecole des Mines de Nantes, Frankreich (Auslandsstudienjahr)
1997 - 2002	Studium der Bauphysik an der Hochschule für Technik, HfT Stuttgart, Diplom
1996 - 1997	Fachoberschule Neu-Ulm, Fachhochschulreife
1993 - 1996	Ausbildung zur Dachdeckergezellin, Fa. Aurnhammer, Ulm

