

**F 3078**

Oliver Kornadt, Christiane Heimerdinger, Leila Nagel  
Raphael Chatel, Giulia De Aloysio, Tobias Schilly

# **Effiziente Innendämmung mit hoher thermischer Speicherfähigkeit**

**F 3078**

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

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2018

ISBN 978-3-7388-0246-7

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

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/tauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/tauforschung)

## Abschlussbericht

**Effiziente Innendämmung mit hoher thermischer Speicherfähigkeit**

**Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-15.06**

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.



Assoziierter Partner:



**Projektleitung:**

**Technische Universität Kaiserslautern  
Fachbereich Bauingenieurwesen  
Fachgebiet Bauphysik / Energetische Gebäudeoptimierung  
Projektleitung: Prof. Dr. Oliver Kornadt  
Bearbeiter: Dipl.-Ing. Christiane Heimerdinger,  
Dr. Leila Nagel, M.Sc. Raphael Chatel, Dr. Giulia de Aloysio,  
Dipl.-Ing. Tobias Schilly  
Paul-Ehrlich-Straße  
Gebäude 29  
D-67663 Kaiserslautern**

## Inhalt

1	Einleitung.....	2
2	Stand der Technik.....	3
2.1	Konventionelle Innendämmsysteme.....	3
2.1.1	Vor- und Nachteile von Innendämmsystemen.....	4
2.1.2	Arten von Innendämmsystemen.....	4
2.2	Phasenwechselmaterialien (Phase Changing Material – PCM).....	5
2.2.1	PCM-Stoffgruppen.....	6
2.2.2	Paraffine – Micronal.....	7
2.2.3	Verwendete PCM-Putz-Mischung.....	8
3	Normative Anforderungen.....	9
3.1	Anforderungen Innendämmung.....	9
3.1.1	DIN 4108.....	9
3.1.2	Energieeinsparverordnung (EnEV).....	10
3.2	Wärmespeicherfähigkeit.....	11
3.2.1	Wärmespeicherfähigkeit in der DIN V 4108.....	11
3.2.2	Wärmespeicherfähigkeit nach DIN EN ISO 13786:2008-4.....	12
4	Vor-Untersuchungen.....	13
4.1	Messtechnische Untersuchung des Wärmeeindringverhalten in PCMhaltige Gipsplatten..	13
4.1.1	Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Bauplatten mit dem Zweiplattengerät.....	13
4.1.2	Messen der Temperaturverteilung während des Abkühlens eines zuvor aufgeheizten Bauteils	13
4.1.3	Messen der Temperaturverteilung während des Aufwärmens eines zuvor gekühlten Bauteils	17
	Versuchsergebnisse PCM-haltige Gipsbauplatte.....	17
4.1.4	Excel-Tool zur Berechnung der Temperaturverläufe.....	20
4.2	Hygrothermische Simulationen zur Notwendigkeit einer Dampfsperre.....	21
4.2.1	Variante 1: Innendämmung ohne Dampfsperre und ohne PCM.....	23
4.2.2	Variante 2: Innendämmung mit Dampfsperre ohne PCM.....	25
4.2.3	Variante 3: Innendämmung und Innenputz mit PCM.....	26
4.2.4	Hygrothermische Detaillösung des Innendämmsystem-Aufbaus.....	27
4.3	Verwendung von gemessenen Innenraumklimata aus dem Projekt „Entwicklung Referenzinnenraumklima“.....	28
5	Gebäudesimulationen.....	31
5.1	Aufbau des Testraums zur Vorbemessung.....	31
5.2	Ergebnisse: Untersuchung sommerliche Überhitzung.....	32
5.2.1	Raum- und Oberflächentemperaturen.....	32

5.2.2	Luftwechselrate und verschiedene Arten der Lüftungssteuerung.....	33
5.2.3	Schichtdicke des PCM- Putzes .....	34
5.2.4	PCM-Konzentration .....	36
5.2.5	Übertemperaturgradstunden.....	37
5.2.6	Phasenwechsel .....	40
5.3	Ergebnisse: Übergangszeit (Herbst) .....	41
5.4	Einfluss des Standorts.....	45
5.5	Simulation der Testwände.....	45
6	Testwände .....	46
6.1	Aufbau .....	46
6.1.1	Auswahl der Materialien .....	47
6.1.2	Lüftung.....	48
6.1.3	Heizung.....	48
6.1.4	Messtechnik.....	48
6.1.5	Errichtung .....	50
6.2	Kalibrierung .....	53
6.3	Voruntersuchungen.....	53
6.3.1	Transmissionswärmeverlust/ Wärmestrom.....	53
6.3.2	Temperaturanstieg.....	55
6.3.3	Luftwechselrate .....	55
6.3.4	Wärmebrückenuntersuchung .....	56
6.3.5	Detailuntersuchungen des thermischen Verhaltens.....	62
6.4	Messablauf .....	63
6.5	Ergebnisse.....	64
6.5.1	Temperaturverteilung an den Testwänden.....	64
6.5.2	Messungen in den unterschiedlichen Schichten.....	65
6.5.3	Messungen mit unterschiedlichen Luftwechselraten .....	67
6.5.4	Messungen mit unterschiedlichen Internen Lasten.....	69
7	Zusammenfassung und Ausblick .....	70
8	Literaturverzeichnis.....	72

# 1 Einleitung

Der Gebäudesektor stellt einen wesentlichen Anteil am bundesdeutschen Energieverbrauch dar. Dies hat zu Folge, dass ohne eine umfassende energetische Ertüchtigung des Gebäudesektors keine erfolgreiche Energiewende möglich ist.

Marktgängige Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) stellen für Außenfassaden eine effiziente Methode dar, um die Transmissionswärmeverluste der Gebäude zu reduzieren. Für einen großen Anteil der Bestandsgebäude ist der Einsatz von WDVS z.B. aus Gründen des Denkmalschutzes jedoch ausgeschlossen. Etwa 5 Prozent der bis 1978 errichteten Altbauten sind ganz oder teilweise denkmalgeschützt, viele haben erhaltenswerte Fassaden (Tobias Loga, 2015). Auch bei Grenzbebauung, geringen Fassadenabständen oder Gebäuden, bei denen nur eine Teilsanierung möglich ist, können keine WDVS eingesetzt werden. In diesen Fällen ist eine energetische Optimierung nur mithilfe von Innendämmsystemen (IDS) realisierbar. Aus bauphysikalischer Sicht bringt der Einsatz von Innendämmsystemen jedoch einige Nachteile mit sich. So sind herkömmliche IDS der massiven Baukonstruktion vorgeschaltet. Dadurch bleiben die Energiespeichereffekte der Baukonstruktion ungenutzt. Damit können durch solare Einstrahlung und interne Lasten hervorgerufene Energieeinträge nicht von der Luft an die Bauteile abgegeben und dort zwischengespeichert werden. Dieser Zustand fördert die sommerliche Überhitzung in innengedämmten Wohn- und Bürogebäuden.

Deshalb ist es zur Realisierung der Energiewende notwendig für Bestandsgebäude, die nicht von außen gedämmt werden können, ein Innendämmsystem zu entwickeln, das als passiver Energiespeicher benutzt werden kann.

Der hier verfolgte Lösungsansatz basiert auf der Verwendung von Latentwärmespeichermaterialien, sogenannten Phasen-Wechsel-Materialien (PCM). PCM haben den Vorteil einer hohen Wärmekapazität mit hoher Temperaturkonstanz bei vergleichbar geringer konstruktiver Masse und geringem Volumen des Materials. Durch Wärmezufuhr wird ein Phasenübergang von fest zu flüssig (Schmelzen) angeregt. Dabei wird die aufgenommene Energie als latente Wärme gespeichert, wobei sich die Wandtemperatur nicht ändert. Dadurch wird das Wärmespeichervermögen der Baukonstruktion erhöht. Infolgedessen wird die Innentemperatur reguliert und eine verbesserte, passive Gebäudekühlung ermöglicht. Um den Effekt langfristig nutzen zu können, muss für eine ausreichende Abkühlung der Raumtemperatur bei Nacht gesorgt werden. Das PCM gibt in diesem Fall beim Erstarren die Wärme wieder an die Raumluft ab. Dadurch werden Temperaturschwankungen im Tag-/Nachtzyklus gepuffert.

Ziel des Projektes ist die Konzipierung eines aufeinander abgestimmten, raumsparenden IDS mit effizienter Wärmedämmwirkung, sowie hoher Energiespeicherfähigkeit und Schadenfreiheit. Im Rahmen dieses Projekts wurde die Möglichkeit untersucht, mittels eingebrachtem Phasenwechselmaterial (Phase Change Material – PCM) den sommerlichen Wärmeschutz zu verbessern und den Wärmeverlust in der Übergangszeit zu reduzieren.

Am Projekt beteiligt sind neben der Technische Universität Kaiserslautern Fachgebiet Bauphysik/ energetische Gebäudeoptimierung als Projektleiter, St. Gobain Isover G+H AG, BASF SE und als assoziierter Partner der Fachverband Innendämmung e.V..

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Konventionelle Innendämmsysteme

Ein Innendämmsystem setzt sich aus mehreren Bestandteilen zusammen: der Tragkonstruktion, dem Dämmstoff, ggf. einer Dampfsperre und der Innenverkleidung. Insgesamt kommen viele Materialien als Dämmstoff für Innendämmsysteme infrage, u.a. Styropor, Polyurethan, Calciumsilikat, Glas- und Steinwolle, Holzwolleleichtbauplatten, Holzweichfaserplatten, Schaumglasplatten oder auch Schilfrohr.

Es gibt zahlreiche Ausführungssysteme auf dem Markt, z.B. Verbundplatten (Dämmstoff ist bereits werkseitig mit der Deckplatte verbunden, teilweise auch mit eingebauter Dampfbremse) oder Systeme, die innenseitig verputzt werden (Hessisches Ministerium für Umwelt, 2011). Je nach eingesetztem Dämmmaterial fungiert dieses als eigenständige Dampfbremse (z.B. Hartschaumplatten oder Schaumglas) oder benötigt eine zusätzliche Dampfbremse (z.B. Polyethylenfolien). Hierbei ist eine sorgfältige luft- und dampfdichte Ausführung wichtig, damit insbesondere bei Wandanschlüssen und Durchdringungen kein Wasserdampf hinter die Dämmung kommt, wo auf Grund der geringen Temperaturen das Risiko der Kondensation besteht.

Um zu erreichen, dass die Transmissionswärmeverluste durch die Außenwand nicht zu hoch werden, sind die optimale Dämmstoffdicke und Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs unter Berücksichtigung der Verkleinerung der Wohnfläche ausschlaggebend. Die Dicke der Dämmung ist dabei oftmals auf 5 bis 10 cm beschränkt. Wie in Abbildung 1 dargestellt, ist eine Dämmstärke von 40 bis 100 mm bei einer WLG 035 am sinnvollsten. Eine weitere Erhöhung der Dämmstoffdicke zeigt nur einen geringen Effekt und ist damit auf Grund der steigenden Kosten nicht mehr zu empfehlen.

Höhere Dämmstärken führen nur noch zu geringen zusätzlichen Energieeinsparungen, da bei der Innendämmung zwangsläufig Wärmebrücken verbleiben, über die nach wie vor Heizwärme abfließt (z. B. Innenwände, Geschossdecken) (Hessisches Ministerium für Umwelt, 2011).

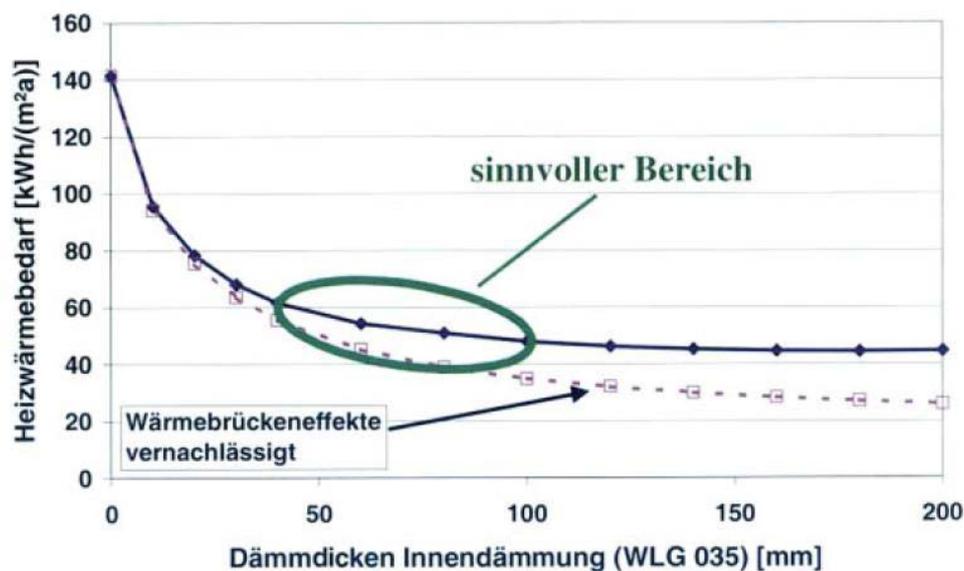


Abbildung 1: Sinnvolle Dämmdicken (Kolbe 2012)

### **2.1.1 Vor- und Nachteile von Innendämmsystemen**

Das Anbringen einer Innendämmung an einer Bestandswand im Altbau hat Vor- und Nachteile. Prinzipiell ist eine Außendämmung aus bauphysikalischer Sicht zu bevorzugen, kann aber nicht überall eingesetzt werden. Nachfolgend sind die Vor- und Nachteile eines Innendämmsystems aufgelistet.

#### **Vorteile**

- schnelleres Aufheizen von Räumen im Winter möglich
- energetische Verbesserung durch Reduzierung der Transmissionswärmeverluste
- Erhöhung der inneren Oberflächentemperatur
- Reduzierung des Schimmelpilzrisikos
- Verbesserung der Behaglichkeit
- schrittweise raumbezogene Sanierung von Gebäuden möglich
- keine Gerüstkosten
- Einbau in denkmalgeschützten Gebäuden ggf. möglich

#### **Nachteile**

- schnelles Erwärmen und Überhitzen der Räume unter sommerlichen Bedingungen
- zusätzliche Unterkonstruktion bei wandbefestigten Möbeln notwendig
- Wärmebrückeneffekte verstärken sich
- Gefahr des Tauwasserausfalls und der Schimmelbildung auf kalten Bauteilen hinter der Dämmebene bei unsachgemäßer Ausführung der Dampfsperre
- ggf. Brandschutzrisiken
- Verlust an Nutzfläche
- Reduzierung des Trocknungspotenzials
- Gefrierpunkt wandert tiefer in das Bauteil, dadurch Gefahr von Frostschäden bei wasserführenden Leitungen, Frostgefahr in den Wänden

### **2.1.2 Arten von Innendämmsystemen**

Die Innendämmsysteme werden generell in drei Kategorien sortiert: diffusionsoffene/kapillaraktive, diffusionsdichte und diffusionsbremsende Innendämmsysteme. Die der letzten beiden Kategorien benötigen zusätzlich eine Dampfbremse (wissen, 2016).

#### **Diffusionsdichte Systeme**

Diffusionsdichte Systeme verhindern mittels passender Produkte und Konstruktionen das Einströmen von Feuchte in das Dämmmaterial von der Raumseite aus. Die Dampfdiffusion wird z.B. durch diffusionsdichte Kunststoffschäume, Beschichtungsstoffe oder Dampfbremsfolien unterbunden. Das Material der Dampfbremse muss über einen genügend großen Diffusionswiderstand verfügen, um die Bildung von Tauwasser an der kühlen Seite zu verhindern. Andernfalls besteht die Gefahr der Schädigung des Dämmmaterials und der Reduktion seiner Dämmwirkung.

Ein Spezialfall der diffusionsdichten Innendämmsysteme sind dampfdichte Dämmplatten. Bei der Verwendung der dampfdichten Dämmplatten wird keine zusätzliche Dampfbremsfolie benötigt. Diese Dämmplatten werden lückenlos auf das Material geklebt und häufig verputzt oder verkleidet.

## **Diffusionsbremsende Systeme**

Diffusionsbremsende Systeme sind in ihrem Aufbau den diffusionsdichten Systemen sehr ähnlich. Mittels Dämmplatten oder dichten Endbeschichtungen gelangt möglichst wenig Wasserdampf in das System. Anstatt einer herkömmlichen kommt eine feuchteadaptive Dampfbremse zum Einsatz. Diese kann sich der vorherrschenden relativen Luftfeuchte anpassen und weist einen wechselnden Diffusionswiderstand auf. Damit unterbindet die Dampfbremse im Winter das Einströmen feuchter Luft in die Wand und ist im Sommer diffusionsoffen und fördert damit die Austrocknung des Bauteils zum Raum hin. Auf den Einbau einer separaten Dichtungsebene kann verzichtet werden, wenn der Dämmstoff selbst einen hohen Diffusionswiderstand aufweist (Dilger, 2016).

## **Diffusionsoffene, kapillaraktive Systeme**

In den vergangenen Jahren ist das Angebot an kapillaraktiven Innendämmsystemen am Markt konsequent gewachsen. Besonders bei Innendämmungen kommen kapillaraktive Dämmmaterialien in Frage, da diese selbst bei schwierigen bautechnischen und bauphysikalischen Randbedingungen eine hohe Funktionssicherheit garantieren. Kapillaraktive Systeme benötigen keine Dampfbremse. Die Endbeschichtung und das Dämmmaterial lassen Wasserdampf durch. So kann die aufkommende Feuchte aus der Luft absorbiert und für eine gewisse Zeit, abhängig von der Speicherfähigkeit des eingesetzten Dämmstoffs, in der Konstruktion unter Verschluss gehalten werden. Erst bei geringer Raumluftfeuchtigkeit wird die Feuchte wieder an den Raum abgegeben. Dies dämpft hohe Feuchteansammlungen in der Raumluft und wirkt sich somit günstig auf das Raumklima aus. Damit das Kondensat, welches auf der kälteren Seite der Dämmung entsteht, zur wärmeren Raumseite hin abgezogen wird, muss der Dämmstoff ohne Hohlräume über die gesamte Fläche auf den Untergrund montiert werden. Vor allem zur Sanierung von Gebäuden mit Schimmelschäden können die kapillaraktiven Innendämmsysteme zur Anwendung kommen, weil aufkommende Feuchte auch in der Umgebung von Wärmebrücken so gut wie eliminiert wird. Allerdings sind ihre Dämmeigenschaften oftmals weniger gut als die von Innendämmsystemen mit Dampfbremse (Dilger, 2016) (Fröhlich, 2015) (wissen, 2016).

## **2.2 Phasenwechselmaterialien (Phase Changing Material – PCM)**

Bei Phase Change Materials, auch PCM oder Phasenwechselmaterialien genannt, handelt es sich um Latentwärmespeicher, die einen hohen Anteil von Wärme- und Kälteenergie über lange Zeit speichern und verlustfrei wieder abgeben können. Ihre Funktionsweise beruht auf der Ausnutzung reversibler thermodynamischer Zustandsänderungen eines Speichermediums, wie zum Beispiel beim Phasenübergang von fest zu flüssig (Erstarren/Schmelzen).

Beim Schmelzen nimmt das Speichermedium sehr viel Wärmeenergie auf. Nach Erreichen der Phasenübergangstemperatur erfolgt so lange keine Temperaturerhöhung, bis das Material komplett geschmolzen ist. Erst beim Erstarren gibt das Speichermedium genau die aufgenommene Wärmemenge wieder ab. Da für längere Zeit trotz Wärmezufuhr keine merkliche Temperaturerhöhung auftritt, wird die während des Phasenübergangs eingespeicherte Wärme „verborgene“ oder auch „latente“ Wärme genannt. Verglichen mit der Wärmespeicherfähigkeit von Baumaterialien wie Gips, Holz, Zement oder Steinen – die im Bereich von 0,8 bis 1,5 kJ/kg in einem 1°C Intervall liegen – können PCM beim Schmelzen ein Vielfaches an Wärme speichern.

Da Phase Change Materials bei ihrer Nutzung flüssig werden, sind sie in der Regel mikroverkapselt. Mit einem Durchmesser von etwa 10 µm (also 10-tausendstel Millimeter) können sie als Zuschlagstoff verschiedenen Baustoffen (wie Innenputze, Spachtelmassen, Gipskartonplatten, Porenbeton-

steine) zugefügt werden. Dabei gibt es PCM aus verschiedenen Materialien. Während in dem vorliegenden Forschungsprojekt Paraffine verwendet wurden, werden sie in Kunststoff- oder Glasscheiben beispielsweise in Form verkapselter Salzkristalle integriert. PCM kommen auch bei der Bauteiltemperierung zum Einsatz. Hier können mithilfe des Materials Temperaturspitzen ohne aufwendige Klimatisierung gekappt werden. Die genannten Beispiele dienen der passiven Temperaturstabilisierung, das heißt, das PCM speichert tagsüber überschüssige Wärmeenergie und führt sie nachts wieder ab.

Eine hohe Wärmekapazität der Bauteile wirkt sich im Sommer verzögernd auf den Temperaturanstieg in den Innenräumen und ebenso im Winter auf den Temperaturabfall aus. Gebäude ohne Speichervermögen heizen sich demzufolge im Sommer schnell auf und kühlen wiederum im Winter in kürzester Zeit ab. In Gebäuden mit geringem Wärmespeichervermögen kann durch den nachträglichen Einsatz von PCM-Materialien die Speichervermögen vergrößert werden. Dies kann beispielsweise im Rahmen einer energetischen Gebäudesanierung durch eine Innendämmung erfolgen oder durch den Einbau von Trennwänden, in denen PCM enthalten ist. (wissen, 2016)

### 2.2.1 PCM-Stoffgruppen

Nachfolgend soll eine Übersicht über mögliche Phasenwechselmaterialien sowie deren wichtigste Anforderungen für die Anwendung im Gebäudebereich gegeben werden. Anschließend wird intensiver auf die Eigenschaften von Paraffinen eingegangen, da ausschließlich dieser Stoff in der weiteren Arbeit betrachtet wird. In Abb. 2 sind die wesentlichen Stoffgruppen, die als PCM in Frage kommen, dargestellt. Die wichtigsten Kriterien bei der Auswahl eines PCM für eine spezielle Anwendung sind die Phasenwechseltemperatur und die Phasenwechselenthalpie. „Bevorzugt werden in Gebäuden typischerweise Speichertemperaturen von 0°C bis 40°C, mit Ausnahme der Warmwasser- und Heizwasserbereitung mit Temperaturen zwischen 50°C und 60°C. Die Integration von PCM in die Gebäudestruktur ist auf den Temperaturbereich 22-25°C fokussiert.“ (Mehling, Latentwärmespeicher, 2009). Daraus folgt, dass viele Stoffe aus Abb. 2 im Gebäudebereich aufgrund ihrer Phasenwechseltemperatur nicht eingesetzt werden können.

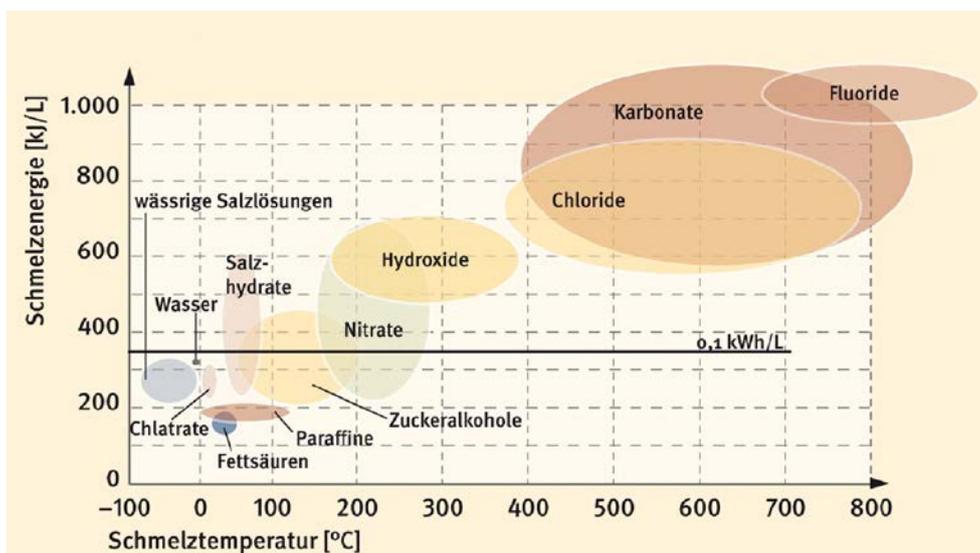


Abbildung 2: PCM unterteilt nach Stoffgruppen (BINE Info)

Salzhhydrate und Paraffine sind die zwei wichtigsten Stoffgruppen, die im Gebäudebereich eingesetzt werden. Erstere kennt man auch aus dem Alltag von sogenannten Handwärmern. Bei der Auswahl eines geeigneten PCMs sind folgende Anforderungen zu berücksichtigen (Harald & F., 2008):

- Physikalische Anforderungen
  - passende Phasenwechseltemperatur
  - große Erstarrungs- und Schmelzenthalpie
  - große Zyklenstabilität [Schmelzen (Energieaufnahme) - Erstarren (Energieabgabe)]
  - passende Wärmeleitfähigkeit
  - geringes Unterkühlen (subcooling)
- Technische Anforderungen
  - Volumenstabilität
  - chemisch stabil
  - chemisch verträglich mit Trägermaterial (nicht korrosiv)
  - nicht gesundheitsschädlich oder umweltgefährdend
- wirtschaftliche Anforderungen
  - günstiger Preis
  - gut recycelbar

Die Phasenwechseltemperatur ist das entscheidende Kriterium. Liegt sie nicht im Anwendungsbereich, kommt es zu keinem Phasenwechsel, somit wird keine Schmelzenthalpie auf- und keine Erstarrungsenthalpie abgegeben. Das PCM ist wirkungslos.

Von „subcooling“ spricht man, wenn das PCM bei einer geringeren Temperatur erstarrt, als es schmilzt. Dies kann bei Anwendungen dazu führen, dass, falls die Erstarrungstemperatur deutlich unter dem Schmelzbereich liegt, das PCM nicht vollständig erstarrt und ein Teil der latenten Wärmespeicherkapazität nicht genutzt werden kann.

### 2.2.2 Paraffine – Micronal

In diesem Projekt wird ausschließlich das kommerzielle Produkt Micronal (BASF SE) verwendet, welches aus Paraffinen besteht. Die Bezeichnung „Paraffin“ stammt von dem lateinischen Begriff „parum affinis“ und bedeutet „wenig reaktionsfähig“.

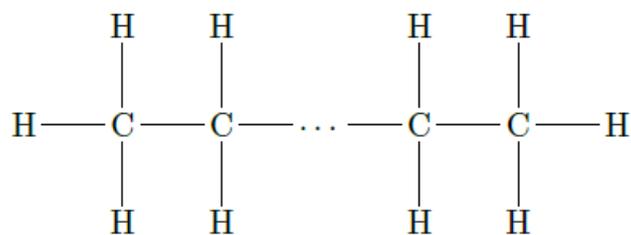


Abbildung 3: Chemische Struktur von Alkanen  $C_nH_{2n+2}$

Chemisch werden als Paraffine gesättigte Kohlenwasserstoffe, genauer acyclischen Alkanen mit der allgemeinen Summenformel  $C_nH_{2n+2}$  und der Struktur nach obiger Abbildung verstanden (Mehling, Latentwärmespeicher, 2009). Umgangssprachlich wird Paraffin auch als Wachs bezeichnet. Durch den gesättigten Charakter der Verbindung sind Paraffine reaktionsträge. So brennen z.B. Kerzen aus Paraffin nicht als Ganzes. Wird jedoch die Siedetemperatur von ca. 250 °C überschritten, werden die langkettigen Alkane gespalten, die entstandenen kurzkettigen Moleküle verdampfen und können nun in einer exothermen Reaktion mit Sauerstoff reagieren. Durch ihre Reaktionsträgheit gibt es für Paraffine nur geringe Sicherheitsauflagen.

Da die Herstellung von reinen Alkanen sehr aufwendig und damit teuer ist, enthalten kommerzielle Produkte wie z.B. Micronal immer eine Mischung von Alkanen unterschiedlicher Kettenlänge. Diese Mischungen haben keine exakte Schmelztemperatur, sondern einen Schmelzbereich, da die unterschiedlichen Alkane je nach Kettenlänge verschiedene Schmelztemperaturen aufweisen. Zudem ist die Schmelzenthalpie von Mischungen etwas geringer als die von reinen Alkanen (Harald & F., 2008). Die Schmelztemperatur eines Alkans hängt von der Anzahl der Kohlenstoffatome in der Verbindung ab. So hat das Alkan mit der Summenformel  $C_{14}H_{30}$  eine Schmelztemperatur von  $6^{\circ}C$ , das Alkan mit  $C_{20}H_{42}$  eine Schmelztemperatur von  $38^{\circ}C$  (Harald & F., 2008). Alkane mit unterschiedlicher Kettenlänge können in bestimmten Verhältnissen gemischt werden, um einen bestimmten Schmelzbereich zu erhalten.

Weitere Vorteile von Paraffinen sind ihre geringe Neigung zum sogenannten „subcooling“ und einer verhältnismäßig großen Phasenwechselenthalpie. Sie sind in Wasser nicht löslich und zeigen auch mit vielen anderen häufig verwendeten Stoffen keine chemischen Reaktionen (Harald & F., 2008). Als Nachteil kann ggf. die geringe Wärmeleitfähigkeit von ca.  $0,2\text{ W/mK}$  gesehen werden, da dadurch die Wärmeführung bzw. -abgabe erschwert wird. Um das Paraffin in die Gebäudestruktur zu integrieren und die Eigenschaften des PCM langfristig zu gewährleisten wurden Technologien entwickelt, die das PCM verpacken um dadurch eine Verunreinigung mit anderen Stoffen zu verhindern. Man spricht in diesem Zusammenhang von Mikro- und Makroverkapselung.

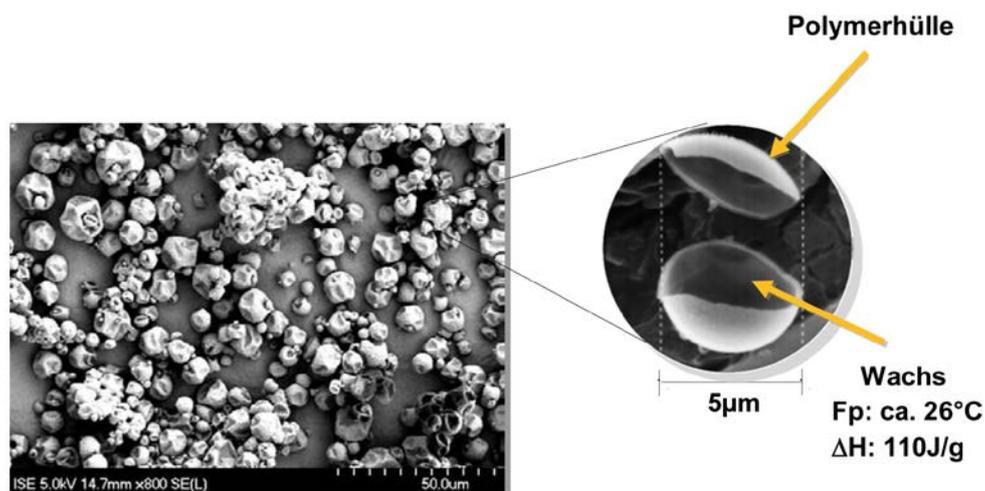


Abbildung 4: Elektronenmikroskopaufnahme eines Mikroverkapselten PCM (BASF SE)

### 2.2.3 Verwendete PCM-Putz-Mischung

Für die nachfolgenden Untersuchungen kommt das PCM Micronal<sup>®</sup> DS 5001 X zur Anwendung. Dieses unterscheidet sich vom Alternativprodukt DS 5000 X lediglich darin, dass es als Pulver und nicht als Dispersion vorliegt. Das PCM wird als Zuschlagsstoff in einen Putz beigemischt, um dessen Wärmespeicherkapazität zu erhöhen. Es werden Putze mit PCM-Konzentrationen von 10%, 20% und 30% untersucht. Modelliert wird ein Leichtputz mit folgenden Eigenschaften:

- Dichte  $\rho = 1000\text{ kg/m}^3$
- Wärmeleitfähigkeit  $\lambda = 0,38\text{ W/mK}$
- spez. Wärmekapazität  $c = 1,0\text{ kJ/kgK}$

Das eingesetzte PCM Micronal<sup>®</sup> DS 5001 X hat eine Dichte von  $\rho = 980\text{ kg/m}^3$ . Ohne PCM hätte der Putz im Temperaturbereich der nachfolgenden Abbildung eine konstante Teilenthalpie von  $1,0\text{ kJ/kg}$ .

Mischt man 20% Micronal®DS 5001 X in den Putz ergeben sich die Teilenthalpien wie in nachfolgender Abbildung. Durch das eingesetzte PCM erhöht sich die Wärmekapazität des Putzes im Bereich von 24 – 26°C deutlich. Ab 27°C ist alles PCM geschmolzen und die Wärmespeicherfähigkeit wird allein durch die sensible Wärmeaufnahme von Bindemittel, Zuschlagsstoff und PCM bestimmt. Auch ein geringer Effekt von subcooling wird aus der nachfolgenden Abbildung deutlich. Man erkennt, dass der Peak der Erstarrungsenthalpie um ca. 1°C hin zu tieferen Temperaturen verschoben ist.

Vergleicht man die Wärmeaufnahme z.B. im Temperaturbereich von 22 – 27°C, so kann der entsprechende Putz ohne PCM rund 6 kJ/kg Wärme aufnehmen. Die PCM-Putz-Mischung mit 20% PCM dagegen ca. 26 kJ/kg. Dies entspricht rund dem 4,4-fachen.

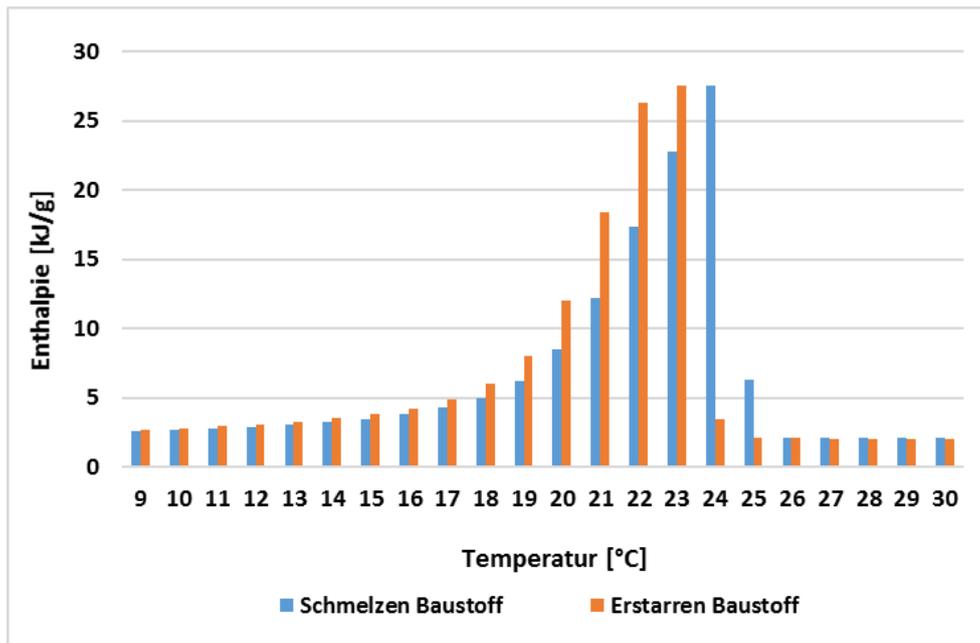


Abbildung 5: Enthalpie des verwendeten Putz mit PCM 23

### 3 Normative Anforderungen

#### 3.1 Anforderungen Innendämmung

Mit dem Wärme- und Feuchteschutz von Gebäuden bzw. Bauteilen beschäftigen sich unter anderem folgende Normen:

- DIN 4108-2 (Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz)
- DIN 4108-3 (Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung)
- Energieeinsparungsverordnung (EnEV)

##### 3.1.1 DIN 4108

###### DIN 4108-2

In dem Teil 2 der DIN 4108 werden die Mindestanforderungen von Bauteilen im Hinblick auf ihre Wärmedämmung definiert. „Die Anforderungen gelten für:

- alle Räume, die ihrer Bestimmung nach auf übliche Innentemperaturen ( $\geq 19^{\circ}\text{C}$ ) beheizt werden;
- alle Räume, die ihrer Bestimmung nach auf niedrige Innentemperaturen ( $\geq 12^{\circ}\text{C}$  und  $< 19^{\circ}\text{C}$ ) beheizt werden;
- sowie für solche Räume, die über Raumverbund durch die vorgenannten Räume beheizt werden“ (DIN 4108-2, 2013).

Der Mindestwert des Wärmedurchlasswiderstands ein- und mehrschaliger Bauteile, welche die oben genannten Räume „gegen die Außenluft, niedrig beheizte Bereiche, Bereiche mit wesentlich niedrigeren Innentemperaturen oder unbeheizte Bereiche abtrennen“ (DIN 4108-2, 2013) und eine flächenbezogene Masse von  $m' \geq 100 \text{ kg/m}^2$  aufweisen, beträgt  $R = 1,2^c \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  (c: bei niedrig beheizten Räumen  $0,55 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ) (DIN 4108-2, 2013). Bei ein- und mehrschaligen Bauteilen mit einer flächenbezogenen Masse von  $m' < 100 \text{ kg/m}^2$  darf der Wärmedurchlasswiderstand einen Wert von  $R = 1,75 \text{ m}^2\text{K/W}$  nicht unterschreiten (DIN 4108-2, 2013).

### **DIN 4108-3**

In dieser Norm werden die „Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für die Planung und Ausführung zum klimabedingten Feuchteschutz in Gebäuden“ (DIN 4108-3, S. 6) geregelt. Das zur Berechnung von Diffusionsvorgängen hier angewandte Verfahren nach Glaser ist ein vereinfachtes Rechenverfahren, welches unter stationären Gegebenheiten lediglich die Dampfdiffusion und Wärmeleitung einkalkuliert. Es ist „für eine nachträgliche Innendämmung mit  $R > 1,0 \text{ m}^2\text{K/W}$  auf einschaligen Außenwänden mit ausgeprägten sorptiven und kapillaren Eigenschaften“ (DIN 4108-3, 2014) nicht zulässig (Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme, 2012).

Wird der Wert der relativen Luftfeuchte der Oberflächen auf der Raumseite, welcher ausschlaggebend für eine bedenkliche oder schädliche Oberflächenwirkung ist, weder erlangt noch überboten, sind die Anforderungen bei der stationären Anschauung hinsichtlich der Verhinderung kritischer Luftfeuchten an Bauteiloberflächen eingehalten. Für die Tauwasserbildung an der Oberfläche liegt der kritische Wert der relativen Luftfeuchte bei  $\phi_{si,cr} = 1$  (entspricht 100 % r. F.). Mit Hilfe von Anhang A der DIN 4108-3 lässt sich die dazugehörige geringste raumseitige Oberflächentemperatur  $\theta_{si,min}$  errechnen, die nicht überschritten werden darf (DIN 4108-3, 2014).

### **3.1.2 Energieeinsparverordnung (EnEV)**

Mit der Neuauflage der Energieeinsparverordnung 2014 wurde die bisherige Anforderung der EnEV 2009 ( $U \leq 0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) bei einer nachträglichen Dämmung von Außenwänden im Gebäudebestand mit Hilfe einer Innendämmung gestrichen.

Viele Bauherren orientieren sich jedoch nicht an der EnEV, sondern an den Förderbedingungen der KfW Bankengruppe für Einzelmaßnahmen. Werden denkmalgeschützte Gebäude mit erhaltenswerten Fassaden auf der Innenseite gedämmt, ist eine Förderung dann möglich, wenn ein U-Wert von  $0,45 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  eingehalten wird. Fast immer lässt sich diese Anforderung bereits mit 40 mm PU der WLS 024 erfüllen. Bei einer Sanierung der Fachwerkaußenwände von innen ist der U-Wert von  $0,80 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  einzuhalten (Fröhlich, 2015).

## 3.2 Wärmespeicherfähigkeit

Normativ berücksichtigt wird die Wärmespeicherfähigkeit bei der energetischen Bilanzierung von Gebäuden nach DIN V 4108-6 in Verbindung mit DIN V 4701-10. Hierbei wird die Baukonstruktion mit DIN V 4108-6 bewertet und der Heizwärmebedarf des Gebäudes bestimmt. Mit DIN V 4701-10 wird anschließend eine Bewertung der Anlagentechnik und eine primärenergetische Bewertung vorgenommen. Daraus erhält man den Endenergiebedarf bzw. den Primärenergiebedarf des Gebäudes. Alternativ ist eine energetische Bewertung nach den Teilen der DIN V 18599 möglich. Diese Norm lässt eine umfangreichere energetische Bewertung zu. Sie integriert die Bewertung von Baukonstruktion und Anlagentechnik in einer Norm.

Ebenso findet die Wärmespeicherfähigkeit beim Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes nach DIN V 4108-2:2013 Berücksichtigung. Alle Normen beziehen sich auf die wirksame Wärmespeicherfähigkeit einer Konstruktion bzw. eines Raumes/Gebäudes, da je nach Betrachtung nur ein Teil der Konstruktion thermisch wirksam wird. Nach DIN V 4108-6 ist die wirksame Wärmespeicherfähigkeit folgendermaßen definiert: „Teilbetrag der Wärmespeicherfähigkeit eines Gebäudes, der einen Einfluss auf den Heizwärmebedarf und auf die sommerliche Raumkonditionierung hat.“

Eine detaillierte Berechnung der Wärmespeicherfähigkeit kann nach DIN EN ISO 13786 erfolgen. In dieser Norm ist von der „wirksamen Wärmekapazität“ die Rede, dieser Begriff wird synonym mit dem Begriff der „wirksamen Wärmespeicherfähigkeit“ verwendet (Flick, 2017).

### 3.2.1 Wärmespeicherfähigkeit in der DIN V 4108

Zentraler Bestandteil ist die Ermittlung des Heizwärmebedarfs, egal nach welcher Norm gerechnet wird. Dieser kann nach dem Monatsbilanzverfahren der DIN V 4108-6 beziehungsweise nach DIN V 18599-2 berechnet werden. Das Monatsbilanzverfahren der DIN V 4108-6 ist in Teil 2 der DIN V 18599 integriert, der Berechnungsablauf ist also gleich, dennoch können sich die Verfahren im Detail unterscheiden.

„Die Wärmespeicherfähigkeit der Bauteile geht bei strenger stationärer Betrachtung nicht in die Wärmebilanz ein. Ihr Einfluss wird aber in dem Zusammenhang mit dem Ausnutzungsgrad der solaren und internen Wärmegewinne und bei Nachtabsenkung berücksichtigt. Es werden nur die für Heizzwecke nutzbaren Wärmegewinne an solarer und interner Wärme bilanziert.“ (DIN V 4108-6, 2003). Der Ausnutzungsgrad berechnet sich wie folgt:

$$\eta = \frac{1 - \gamma^\alpha}{1 - \gamma^{\alpha+1}} \quad \text{wenn } \gamma \neq 1$$

$$\eta = \frac{\alpha}{\alpha+1} \quad \text{wenn } \gamma = 1$$

In den Ausnutzungsgrad fließt das Wärmegewinn-Wärmeverlust-Verhältnis  $\gamma$  und der Parameter  $\alpha$  ein.

$$\gamma = \frac{Q_g}{Q_l}$$

$$\alpha = \alpha_0 + \frac{\tau}{\tau_0}$$

In den Parameter  $\alpha$  gehen die nach Norm festgelegten Konstanten  $\alpha_0 = 1$  und  $\tau_0 = 16$ , sowie die Zeitkonstante  $\tau$  des Gebäudes ein. Die Zeitkonstante beschreibt vereinfacht gesagt, die Auskühlzeit eines Gebäudes und hat die Einheit [h]. Diese wird nach Norm zu

$$\tau = \frac{C_{\text{wirk}}}{H}$$

bestimmt. Die wirksame Wärmespeicherfähigkeit  $C_{\text{wirk}}$  beschreibt die in der Baukonstruktion gespeicherte Energiemenge in [Wh/K] und  $H$  die spezifischen Wärmeverluste des Gebäudes in [W/K] des jeweiligen Monats. Durch die Berücksichtigung der Zeitkonstante werden in dem stationären Berechnungsverfahren der Norm die instationären Prozesse von Wärmespeicherung und zeitverzögerter Wärmeabgabe mitberücksichtigt. Für die wirksame Wärmespeicherfähigkeit können nach Norm entweder pauschale Werte (siehe DIN V 4108-6; DIN V 18599) angesetzt oder  $C_{\text{wirk}}$  nach DIN EN ISO 13786 berechnet werden. „In der Regel ist das vereinfachte Verfahren nach DIN EN ISO 13786:2008-04, Anhang A, zu verwenden (10-cm-Regel). Für Bauteile mit thermisch abgedeckten Speichermassen (z. B. aufgeständerte Fußböden oder abgehängte Decken) ist das ausführliche Verfahren zu wählen.“ (DIN V 18599-2, 2016). Im vereinfachten Verfahren nach Anhang A berechnet sich die wirksame Wärmespeicherfähigkeit  $C_{\text{wirk}}$  nach folgender Gleichung:

$$C_{\text{wirk}} = \sum_i c_i * \rho_i * d_i * A_i$$

$c_i$  beschreibt die Wärmekapazität der betrachteten Schicht,  $\rho_i$  die Dichte der Schicht,  $d_i$  die Schichtdicke und  $A_i$  die Bauteilfläche. Das Verfahren der wirksamen Dicke in Anhang A.2.4 der DIN EN ISO 13876:2008-04 entspricht sinngemäß den Angaben der in DIN V 4108-6 auf S.39 angegebenen Bedingungen. Die Wirkung thermischer Speichermasse auf die Energiebilanz wird durch die Normen auch bei unterbrochenem oder abgesenktem Heizbetrieb berücksichtigt.

### 3.2.2 Wärmespeicherfähigkeit nach DIN EN ISO 13786:2008-4

Mit der Norm DIN EN ISO 13786 lässt sich die flächenbezogene wirksame Wärmekapazität von Bauteilen bestimmen. Multipliziert mit der Fläche des Bauteils erhält man die wirksame Wärmekapazität  $C_{\text{wirk}}$ . Aufsummiert über die Flächen eines Raumes oder Gebäudes, ergibt sich die wirksame Wärmekapazität von Räumen und Gebäuden. Für die Bestimmung der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit bietet die Norm mehrere Verfahren. Handelt es sich um Bauteile mit nicht ebenen planparallelen Schichten oder stark inhomogenen Baustoffen, können mit geeigneter Software durch numerische Simulation und nach den Regeln zur Bauteilmodellierung der DIN EN ISO 10211 die thermisch-dynamischen Kenngrößen, darunter auch die flächenbezogene wirksame Wärmekapazität, bestimmt werden. Zudem gibt es ein vereinfachtes Berechnungsverfahren für Bauteile, „die aus ebenen Schichten homogener oder weitgehend homogener Baustoffe zusammengesetzt sind“ (DIN EN ISO 13786, 2008). Darüber hinaus enthält die Norm in Anhang A drei weitere vereinfachte Verfahren. „Die Verfahren in Anhang A eignen sich insbesondere zur Bestimmung der dynamisch-thermischen Kenngrößen, die für die Bewertung des Heizenergiebedarfs benötigt werden. Diese Näherungswerte genügen jedoch nicht für eine Produktkennzeichnung“ (DIN EN ISO 13786, 2008).

## **4 Vor-Untersuchungen**

### **4.1 Messtechnische Untersuchung des Wärmeeindringverhalten in PCMHaltige Gipsplatten**

Zur Bestimmung des Einflusses von PCM auf das Wärmeeindringverhalten in ein Material wurden zwei Gipsplatten, eine mit und eine ohne PCM untersucht und die Ergebnisse miteinander verglichen. Dazu wurde eine marktübliche fermacell Gipsplatte und eine von der BASF eigens für die Messungen angefertigte PCMHaltige Gipsplatte verwendet. Diese beinhaltet 12 % PCM mit einer Schmelztemperatur von 23 °C. Vor Beginn der Messungen des Wärmeeindringverhaltens wurde die Wärmeleitfähigkeit beider Platten experimentell bestimmt.

#### **4.1.1 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Bauplatten mit dem Zweiplattengerät**

##### **Versuchsdurchführung**

Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Gipsbauplatten wird das Zweiplattenverfahren verwendet, welches in der DIN 52612 festgelegt ist. Jeweils zwei zu untersuchende Platten befinden sich zwischen einer Heiz- und den beiden Kühlplatten. Der Wärmestrom von der Heizplatte durchdringt die Proben und wird von den Kühlplatten abgeführt. Ein seitlicher Wärmestrom wird durch einen Schutzheizring weitestgehend verhindert. Zwischen der Heizplatte und der Kühlplatte wird eine Temperaturdifferenz von 10 K eingestellt und es werden drei Messungen bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt. Die Mittelwerte aus den jeweiligen drei Messungen werden gebildet und damit die Wärmeleitfähigkeit des Baustoffes bestimmt.

Diese Untersuchung wurde für zwei verschiedene Gipsbauplatten durchgeführt, wobei die PCM Gipsbauplatte eine Wärmeleitfähigkeit von 0,237 W/(m\*K) und die fermacell Referenz-Gipsbauplatte eine Wärmeleitfähigkeit von 0,126 W/(m\*K) aufweist.

#### **4.1.2 Messen der Temperaturverteilung während des Abkühlens eines zuvor aufgeheizten Bauteils**

##### **Versuchsaufbau**

In die Gipsbauplatten werden Temperaturfühler (Widerstandssensor Ntc) eingebaut, um die Temperaturverteilung an ausgewählten Stellen zu messen. Ihre Positionen werden so gewählt, dass keine Thermoelemente der Thermoelementfolie des Zweiplattengerätes (vgl. graue Felder in Abb. 7) punktförmig belastet werden. Die Temperaturfühler werden vor dem Einbringen kalibriert, um eine zuverlässige Messung zu garantieren.

In der jeweiligen Tiefe werden sie mit Wärmeleitpaste fixiert und das restliche Bohrloch mit identischem Gipsplattenmaterial verfüllt, damit weiterhin ein homogenes Bauteil besteht.

Nachfolgende Abbildung 6 skizziert die Positionen der einzelnen Temperatursensoren und Abbildung 7 zeigt die Platte vor dem Einsetzen in das Zweiplattengerät.

Legende:  
Zahl --> Bauteiltiefe

- 1 ->  $x = 0$  cm
- 2 ->  $x = 0,4$  cm\*
- 3 ->  $x = 0,4$  cm\*
- 4 ->  $x = 0,83$  cm
- 5 ->  $x = 0,83$  cm
- 6 ->  $x = 1,67$  cm
- 7 ->  $x = 1,67$  cm
- 8 ->  $x = 2,1$  cm\*
- 9 ->  $x = 2,1$  cm\*
- 10 ->  $x = 2,5$  cm

\* ab Versuchsserie 2

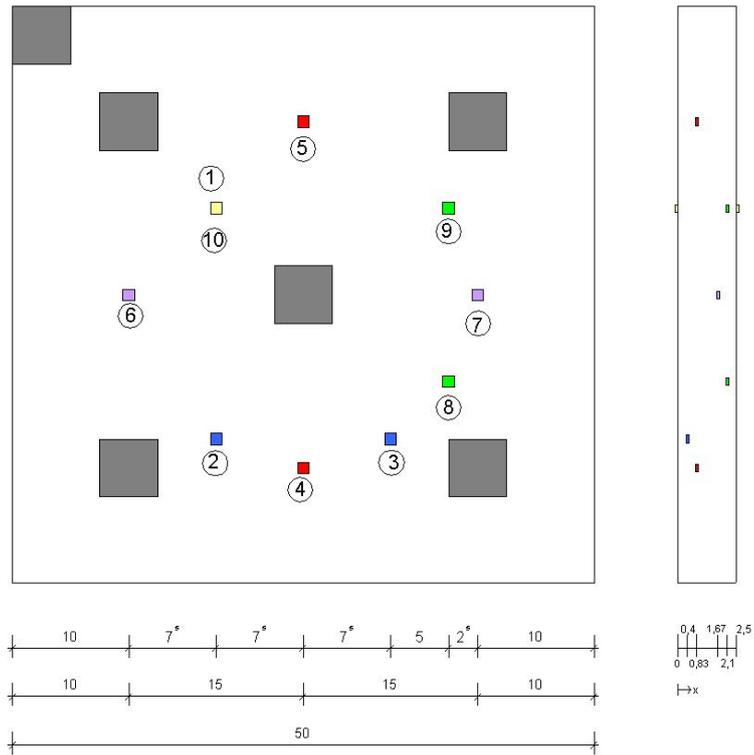


Abbildung 6: Lage der Temperaturfühler

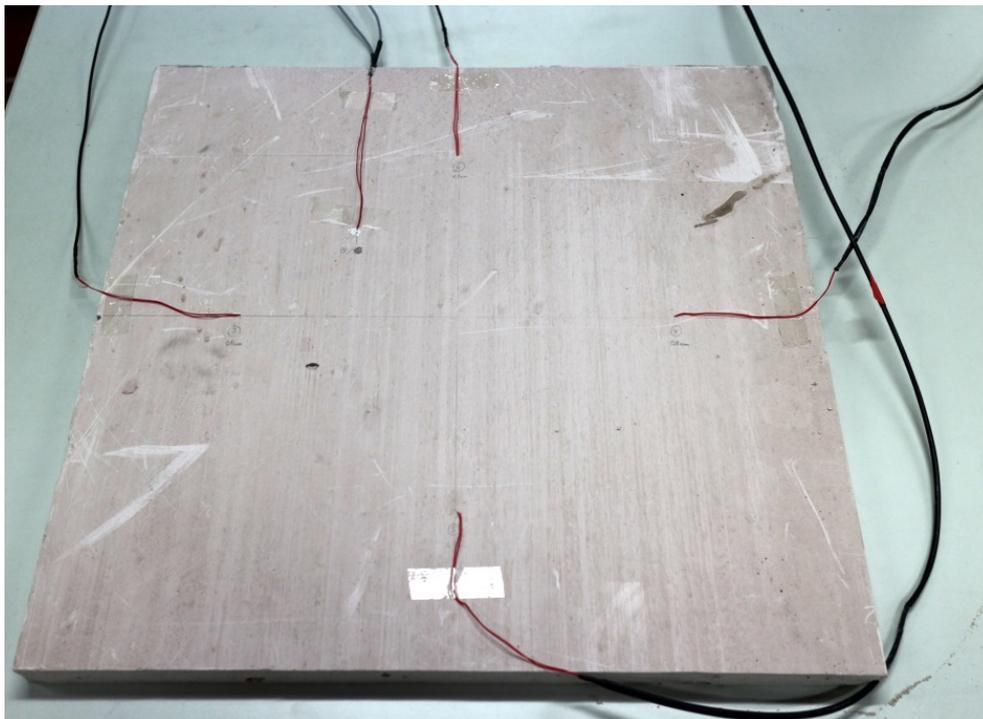


Abbildung 7: Bild einer Platte vor dem Einbau

## Versuchsergebnisse

In diesem Abschnitt wird zunächst der Erwärmungsvorgang einer Platte untersucht, die vorab 12 Stunden bei 13 °C gelagert wird. Dadurch kann der Abschluss der Phasenumwandlung des PCM von flüssig zu fest sichergestellt werden. Im Anschluss wird die Platte mit Hilfe der Heizplatte des Zweiplattengeräts erwärmt. Ist die gewünschte Temperatur erreicht, wird die Heizplatte abgeschaltet und das Temperaturverhalten während des Abkühlvorgangs aufgezeichnet.

Abbildung 8 zeigt die Temperaturverläufe an der Oberfläche sowie in verschiedenen Bauteiltiefen während des Aufheizvorgangs. Die Oberflächentemperatur an der Heizplatte zeigt keinen erwünschten konstanten Verlauf an. Das liegt daran, dass sich die Heizplatte schrittweise erwärmt und somit die Messung beeinflusst. Mögliche Speichereffekte des PCM können dadurch nicht festgestellt werden.

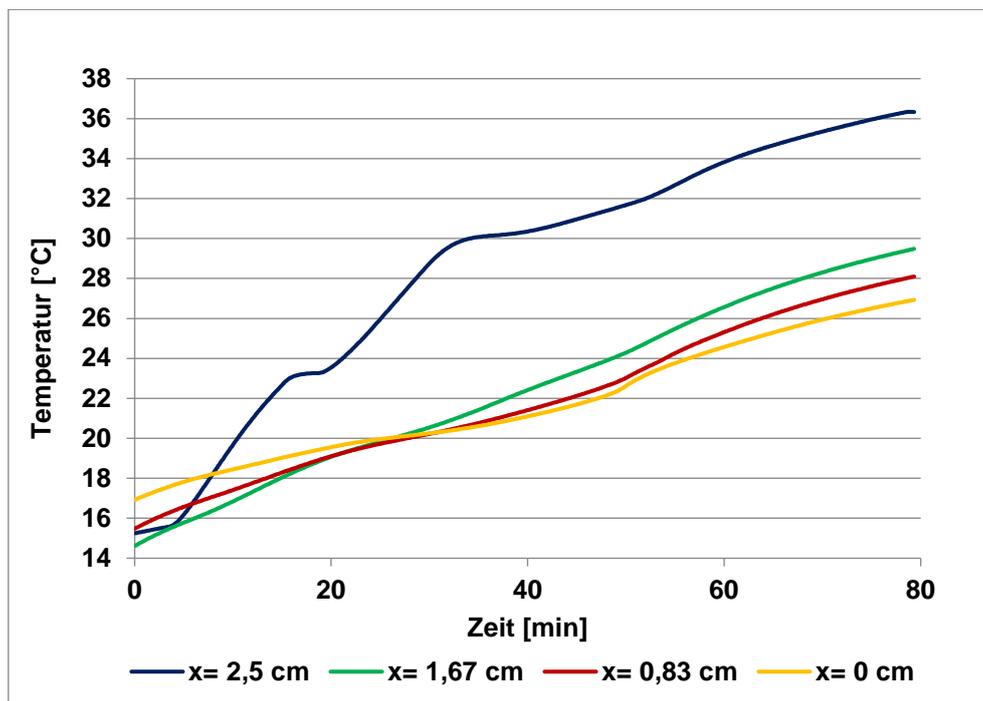


Abbildung 8: Temperaturverlauf während des Erwärmens

Desweiteren ist anzumerken, dass die der Kühlplatte zugewandte Plattenseite (gelber Verlauf) zu Beginn der Messung eine höhere Temperatur aufweist als das Bauteilinnere. Es entstehen also zwei Wärmeströme in der Platte selbst. Einmal von der Heizplatte in Richtung Bauteilinneres  $\Phi_1$  und einmal entgegen gesetzt  $\Phi_2$ .  $\Phi_2$  ist jedoch größer als  $\Phi_1$ , so dass nach etwa 27 Minuten überall die gleiche Temperatur in der Platte herrscht. Anschließend wirkt nur noch  $\Phi_2$  aus der Heizplatte.

Wird diese im nächsten Schritt ausgeschaltet, kennzeichnet sich erst nach etwa 10 Minuten ein Maximum der Temperatur im Bauteilinneren ab (vgl. Abbildung 9).

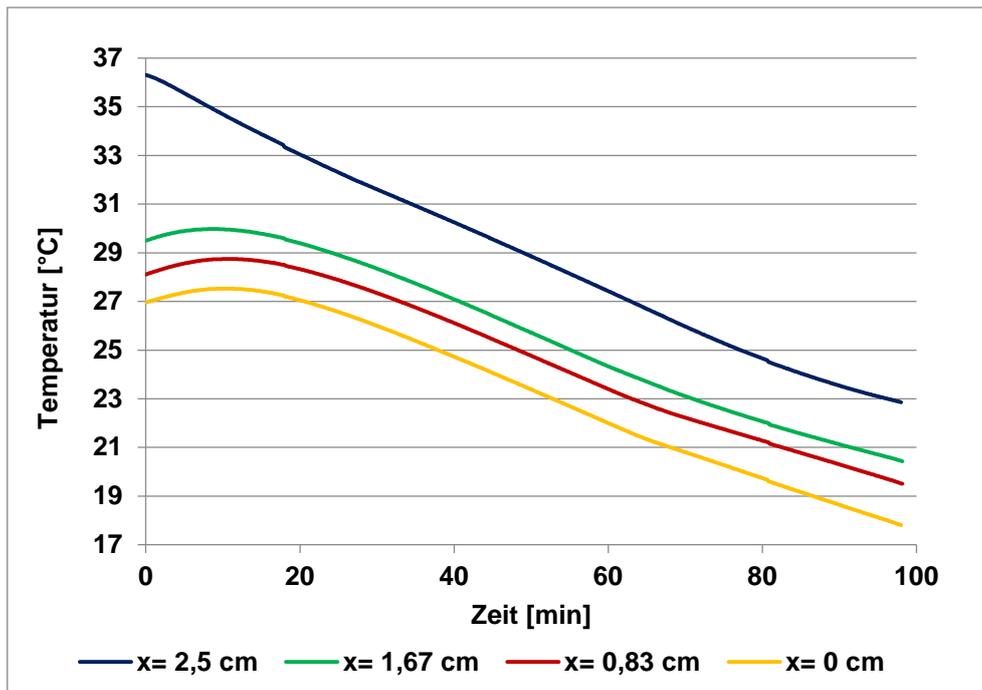


Abbildung 9: Temperaturverlauf während des Abkühlens

Im Gegensatz zum Erwärmungsvorgang verläuft das Abkühlen linear. Die parallelen Geraden in nachfolgender Abbildung 10 zeigen anhand ihres nahezu gleichen Abstandes untereinander, dass die Temperaturen gleichmäßig in allen Bauteiltiefen abnehmen. Die Leistung des in dem Versuchsaufbau verwendeten Kühlsystems, sowie die Wärmekapazität des Kühlwassers waren sehr hoch. Dadurch konnte die im Vergleich dazu geringe, vom PCM abgegebene Wärmeenergie direkt mit abgeführt werden. Deshalb kommen Einflüsse durch das enthaltene Phasenübergangsmaterial nicht zum Ausdruck.

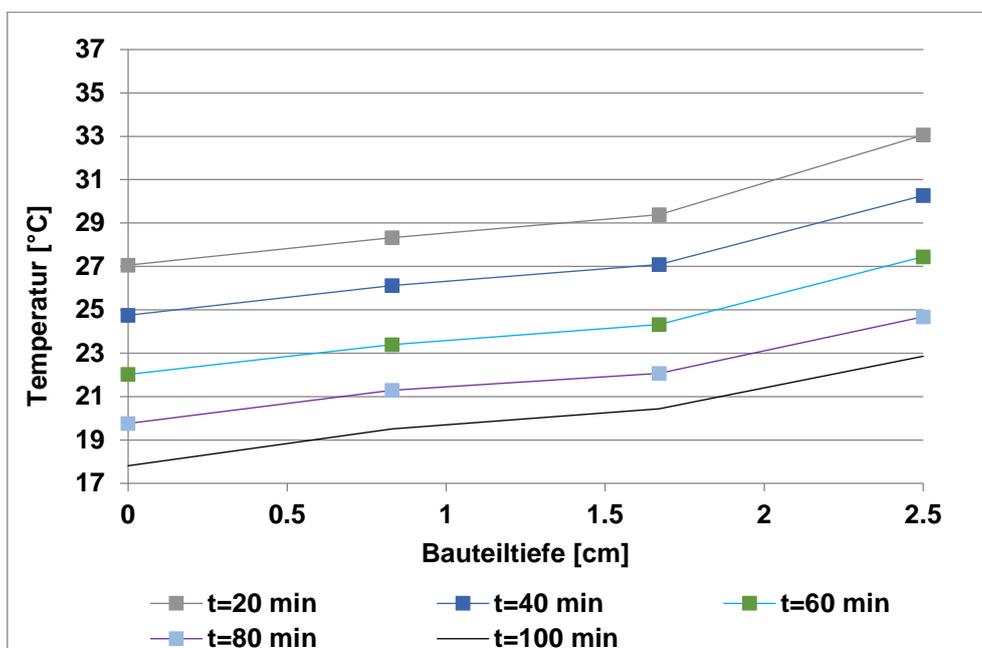


Abbildung 10: Temperaturverlauf im Bauteil zu verschiedenen Zeitpunkten

#### 4.1.3 Messen der Temperaturverteilung während des Aufwärmens eines zuvor gekühlten Bauteils

##### Versuchsvorbereitung

Die zweite Versuchsserie besteht zum einen im Abkühlen der Gipsbauplatten in einem Kühlschrank bei etwa 13 °C und zum anderen im Messen der Temperaturverteilung bei der Erwärmung durch eine konstante Umgebungstemperatur. Um ein genaueres Temperaturprofil zu erzeugen, werden vier weitere Temperatursensoren in zwei zusätzlichen Tiefen verbaut. Anschließend werden die Platten senkrecht in eine Halterung gestellt (vgl. nachfolgende Abbildung 13). Da die seitliche Ausdehnung der Platte viel größer als die Dicke der Platte ist, erfolgt der Wärmetransfer nur senkrecht zur Platte.

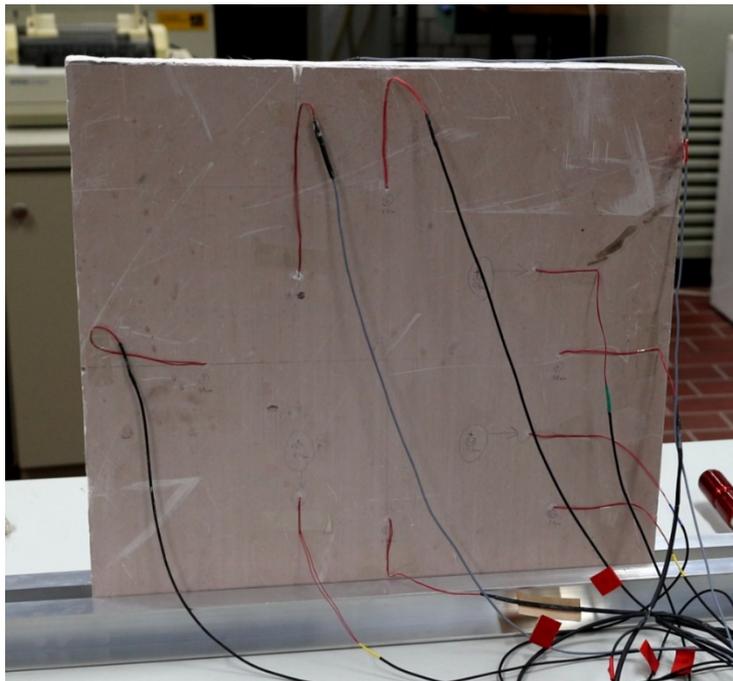


Abbildung 11: Aufbau Versuchsserie (PCM haltige Gipsbauplatte)

##### Versuchsergebnisse PCM-haltige Gipsbauplatte

Durch die Erwärmung der Oberflächen entsteht in der Platte ein Temperaturgradient und dementsprechend ein Wärmestrom. Der dargestellte Temperaturverlauf zu unterschiedlichen Zeitpunkten (Abbildung 12) zeigt, dass die Temperatur von der Plattenmitte zur Oberfläche zunimmt, mit der Zeit immer höher wird und nach etwa 150 Minuten den Wert der Raumtemperatur von etwa 28°C erreicht.

Die Änderung des Wärmestroms in der Platte wird nur durch die Änderung des Temperaturgradienten bewirkt. Durch den Wärmestrom steigen mit der Zeit der Wärmehalt und damit die Temperatur der Platte.

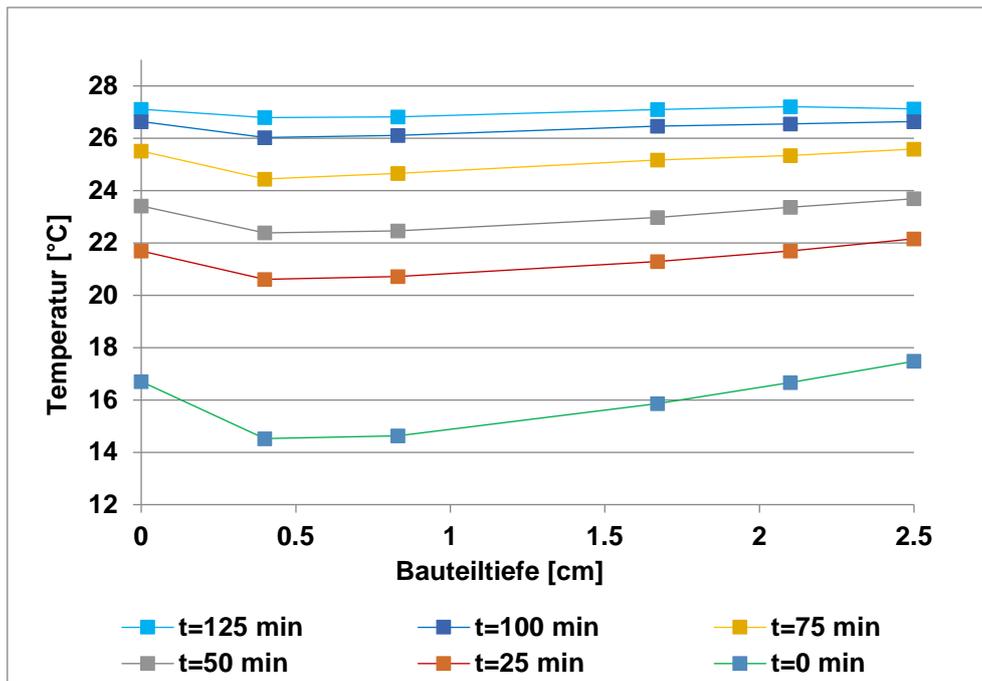


Abbildung 12: Temperaturverlauf im Bauteil zu verschiedenen Zeitpunkten

Werden die gemessenen Temperaturen der Zeit gegenübergestellt, so fällt ein gleichmäßiges Ansteigen der Temperaturen auf. Bei Erreichen der Schmelztemperatur des Phasenübergangsmaterials verlangsamt sich der Temperaturanstieg deutlich. Es ist eine Abschwächung des Temperaturanstiegs bei Erreichen des Phasenübergangs bei 23°C zu beobachten. Nachdem der Schmelzvorgang abgeschlossen ist, passt sich die Temperatur der Raumlufttemperatur an (vgl. Abbildung 13).

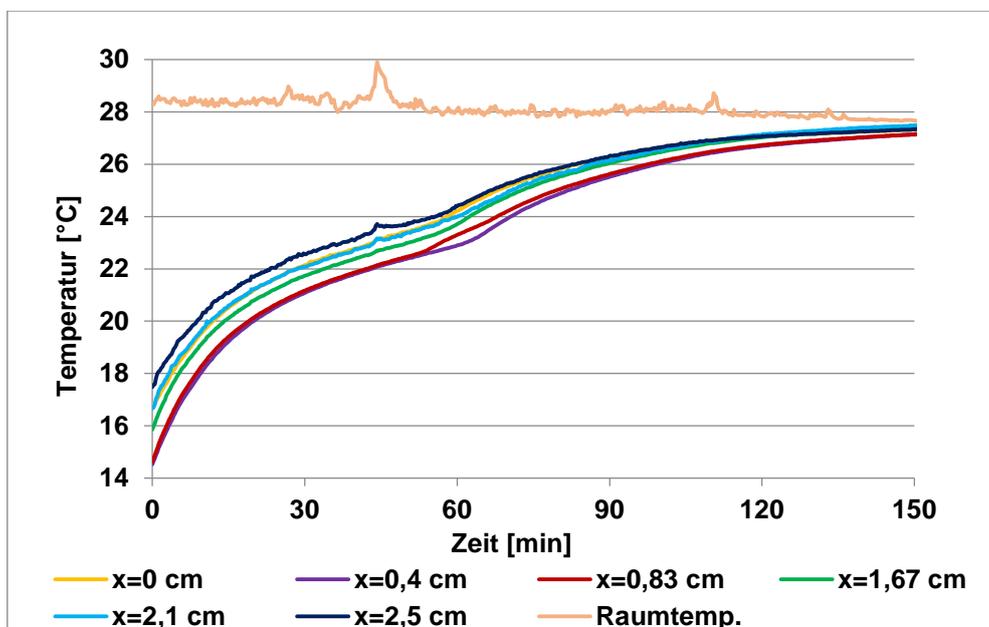


Abbildung 13: Temperaturverlauf während des Erwärmens

## Vergleich mit einer Referenzmessung an einer gewöhnlicher Gipsbauplatte

Um die Ergebnisse der Gipsbauplatte mit eingebautem PCM validieren zu können, werden identische Messungen an gewöhnlichen Gipsbauplatten ohne PCM durchgeführt. Es kommen Platten von der Firma fermacell zum Einsatz mit einer Dicke von 10 mm. Um möglichst gleiche Bedingungen herzustellen, werden drei dieser Platten mit Hilfe von Wärmeleitpaste aufeinander geklebt und in den Ecken verschraubt.

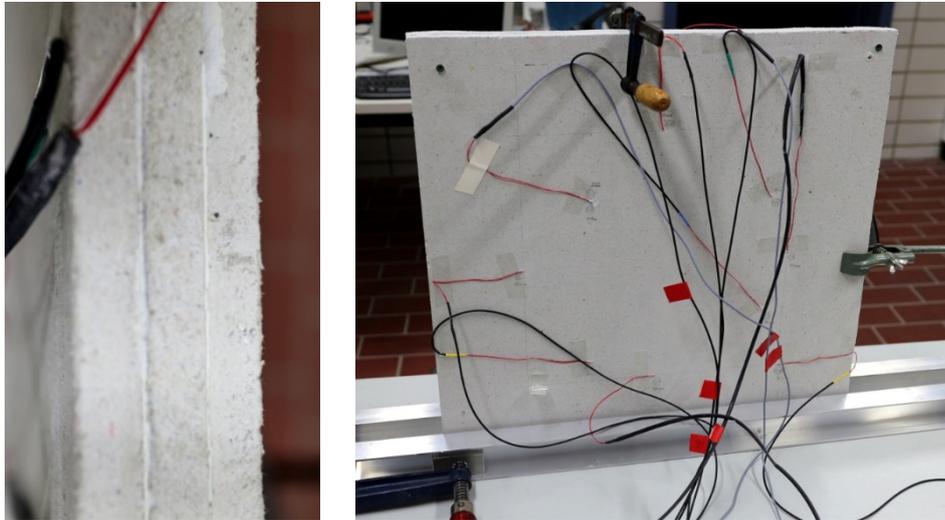


Abbildung 14 links: geklebte Platte, rechts: Versuchsaufbau Referenzmessung

Das nachfolgende Diagramm zeigt den Temperaturverlauf der zuvor gekühlten Platten während der Erwärmung durch die Raumtemperatur. Zu Beginn der Messung betragen die Temperaturen an den Plattenoberflächen ca. 11,5 °C, im Platteninneren nur 7 °C, da sie vorab im Kühlschrank gelagert wurden. Der Verlauf steigt gleichmäßig an und nähert sich der Umgebungstemperatur von 27 °C an.

Verglichen mit der PCM-haltigen Gipsbauplatte verhält sich der Anstieg der Temperatur bis zum Schmelzbereich des PCM gleich, bildet jedoch kein Plateau, sondern erwärmt sich stetig weiter bis ein stationärer Zustand in der Platte erreicht ist (vgl. Abbildung 15).

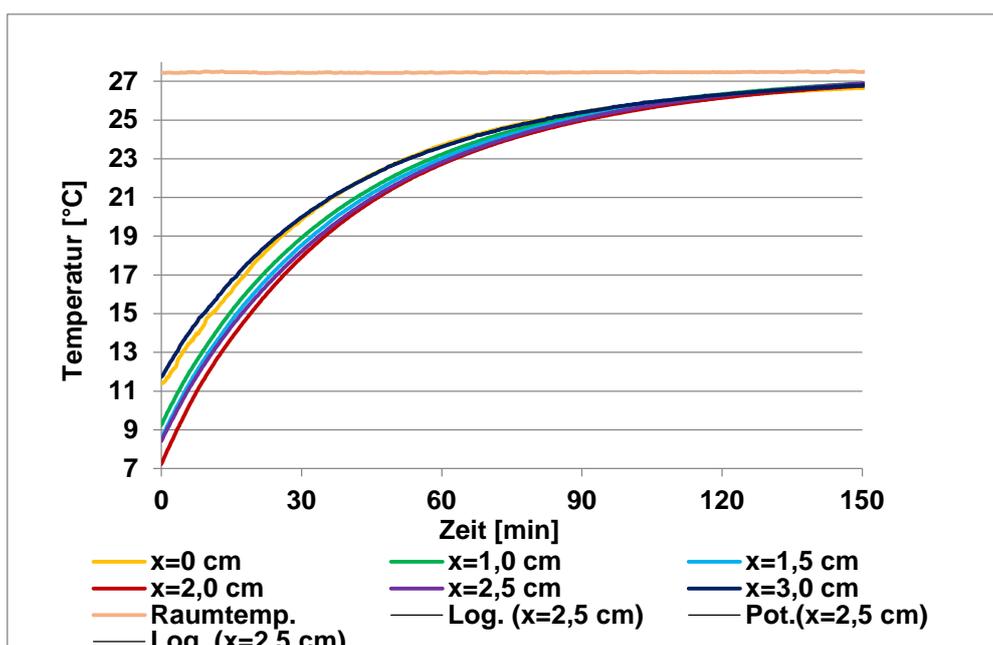


Abbildung 15: Temperaturverlauf während des Erwärmens

Im folgenden Diagramm 16 werden die Verläufe der Oberflächentemperaturen beider Platten direkt gegenübergestellt. Da die PCM-haltige Gipsplatte eine Anfangstemperatur von etwa 17 °C und die gewöhnliche eine Anfangstemperatur von 9 °C aufweist, wird bei letzteren nur der Verlauf ab 17 °C aufgezeichnet. Die Temperaturdifferenz der Umgebungstemperaturen von 1 K führt zu geringfügig unterschiedlichen Endtemperaturen.

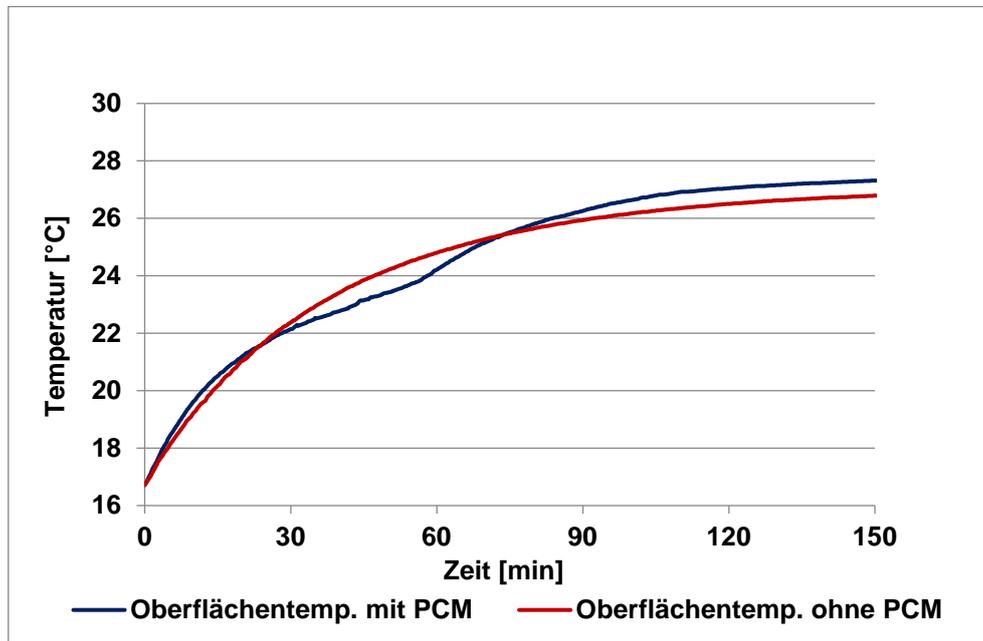


Abbildung 16: Temperaturverläufe beider Platten im Vergleich

Gut zu erkennen sind zum einen der eben beschriebene gleichmäßige Temperaturanstieg bei der Platte ohne PCM, und zum anderen der verlangsamte Anstieg der Temperatur im Bereich der Schmelztemperatur bei der Platte mit PCM, da dort zusätzliche Energie für den Schmelzprozess aufgebracht werden muss.

#### 4.1.4 Excel-Tool zur Berechnung der Temperaturverläufe

Um die Temperaturverläufe von allgemeinen PCM-haltigen Materialien ermitteln zu können, wurde an der Technischen Universität Kaiserslautern ein Excel-Tool entwickelt, mit Hilfe dessen die korrekte Berücksichtigung des Phasenwechsels möglich ist. Mithilfe der Eingabe bekannter Materialparametern, wie z.B. Wärmeleitfähigkeit oder Konzentration, erlaubt das Tool die Berechnung der Temperaturverläufe in den verschiedenen Schichttiefen eines Materials. Die für die Berechnung notwendigen Materialkennwerte der Platte wie die spezifische Wärmekapazität  $c$  in Abhängigkeit der Temperatur wurden im Vorfeld experimentell ermittelt bzw. außerhalb des Phasenübergangs dem Produktdatenblatt entnommen.

#### Bedingungen

Die Anfangstemperaturverteilung in der Platte zum Zeitpunkt  $t=0$  wird den Messungen entnommen. Fehlenden Temperaturwerte in einer Bauteiltiefe werden durch Interpolation ergänzt. Die konstante Temperatur der Umgebungstemperatur entspricht dem Mittelwert der gemessenen Raumtemperatur.

An den Plattenrändern liegt eine Randbedingung der 3. Art vor. Die Luftschicht wird dabei als Fluidschicht aufgefasst, die an die feste Oberfläche der Platte grenzt. Der Wärmeübergangskoeffizient  $h$  an

Bauteiloberflächen in einem Raum besteht aus den Anteilen der Wärmetransportvorgängen Konvektion und Strahlung. Er ist kein fester Stoffwert, sondern abhängig von Parametern wie Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit, Oberflächenbeschaffenheit und den geometrischen Verhältnissen. Raumseitig wird er vom natürlichen Auftrieb der warmen Luft bestimmt. Nach DIN EN ISO 6946 Tabelle 1 kann für  $h$  bei aufwärtsströmendem Wärmestrom der Bemessungswert von

$$h = 10 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

gewählt werden.

Im Bereich des Platteninneren erfolgt der Wärmetransport durch Wärmeleitung mit den Materialparametern der Gipsbauplatte.

### Vergleich der Temperaturverläufe

Es wird deutlich, dass die Berechnung mit Hilfe des expliziten Differenzenverfahrens mit abschnittsweiser konstanter spezifischer Wärmekapazität den Temperaturverlauf in einer Gipsbauplatte wirklichkeitsgetreu abbildet.

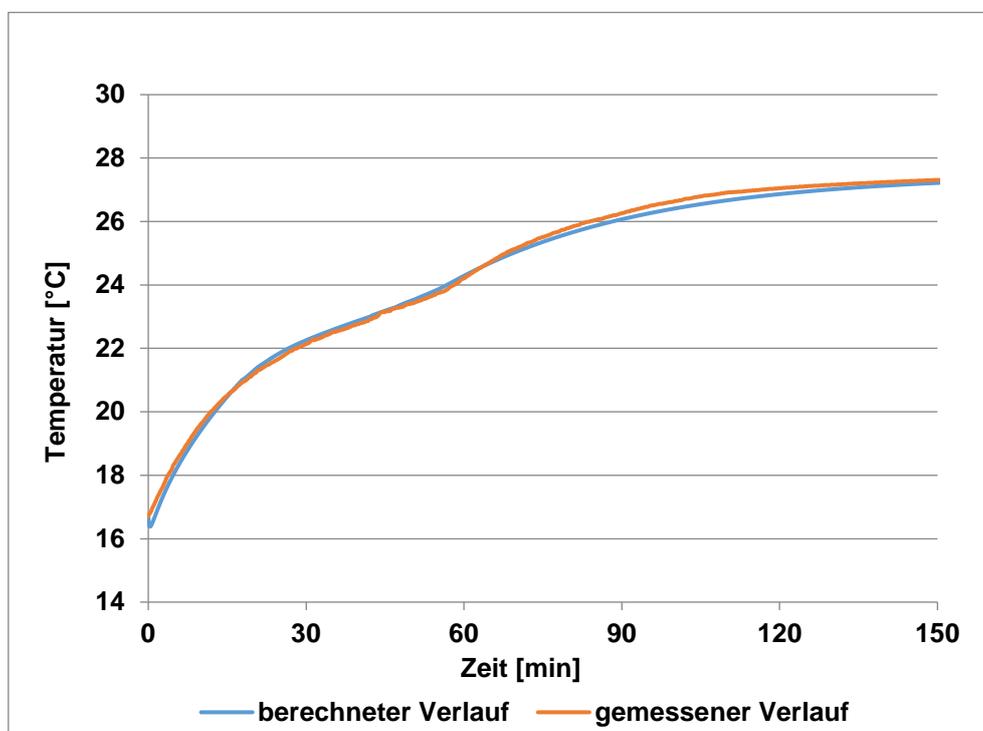


Abbildung 17: Vergleich der berechneten und gemessenen Plattenrandtemperaturen

## 4.2 Hygrothermische Simulationen zur Notwendigkeit einer Dampfsperre

Mit Hilfe des Simulationsprogramms WUFI Pro 6.0 wurde die Notwendigkeit zum Einbau einer Dampfsperre untersucht. Dazu wurde der folgende Aufbau betrachtet:

- Kalkzementputz 2 cm, Rohdichte 1900 kg/m<sup>3</sup>
- Vollziegelmauerwerk 36,5 cm, Rohdichte 2.000 kg/m<sup>3</sup>, Wärmeleitfähigkeit:  $\lambda = 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Wärmedämmung Mineralwolle 10 cm, Wärmeleitfähigkeit:  $\lambda = 0,04 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Gipsputz (ohne und mit 30% PCM) 1 cm, Wärmeleitfähigkeit:  $\lambda = 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Es wurden als Klimadaten Holzkirchen; IBP, Feuchtereferenzjahr ausgewählt. Es werden fünf Jahre dargestellt, um den Gesamtwassergehalt einer Wand aus Mauerwerk mit Innendämmung einzupendeln (Abbildung 18). Die Simulation der Temperatur der Innenoberfläche und die Taupunkttemperatur (Abbildung 19) zeigen ebenfalls keine Veränderung über den untersuchten Zeitraum auf.

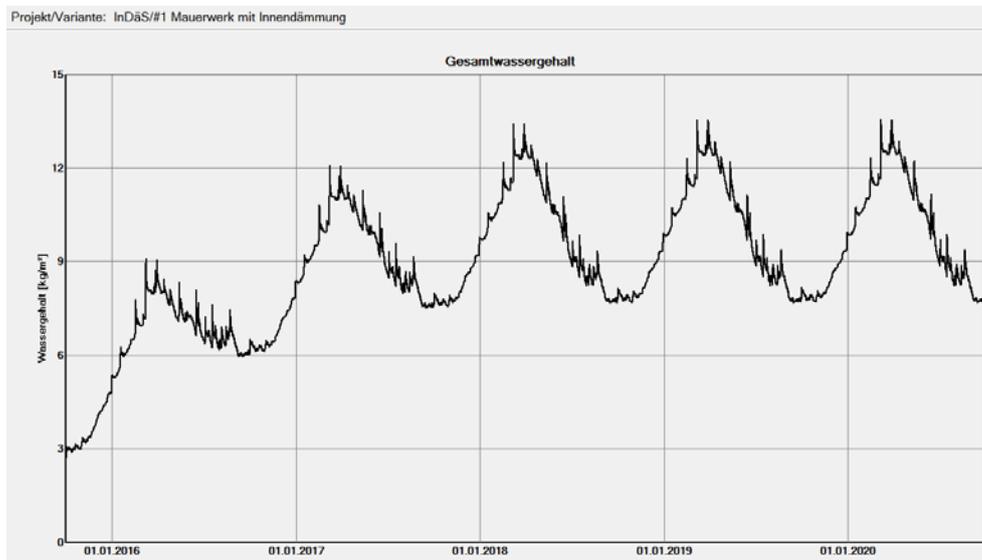


Abbildung 18: Gesamtwassergehalt Wand mit Innendämmung

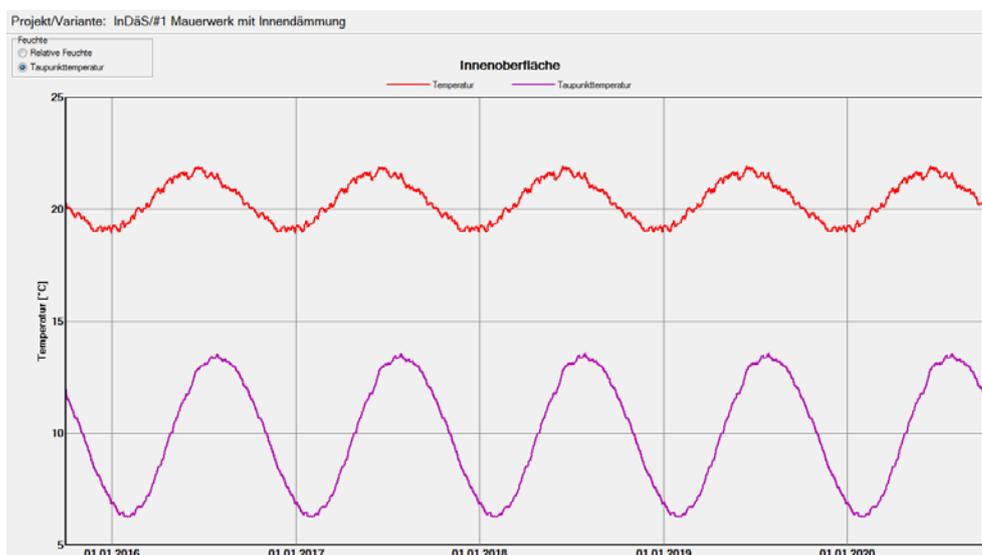


Abbildung 19: Temperatur der Innenoberfläche mit Taupunkttemperatur

#### 4.2.1 Variante 1: Innendämmung ohne Dampfsperre und ohne PCM

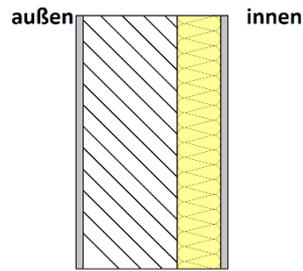


Abbildung 20: schematischer Aufbau Variante 1

Als erste Variante (Abbildung 20) wurde der beschriebene Grundaufbau mit einem Gipsputz ohne PCM verwendet. Abbildung 21 zeigt bei einer Wand mit Innendämmung, dass die Temperatur auf der Innenoberfläche über der Taupunkttemperatur liegt. Ein Tauwasserausfall an der Wandinnenoberfläche entsteht nicht.

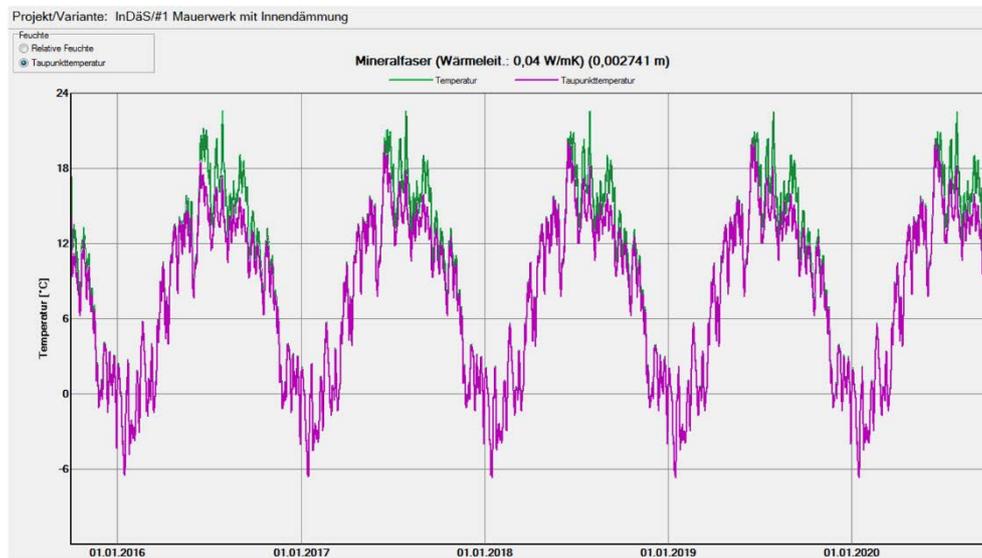


Abbildung 21: Temperatur der Innenoberfläche mit Taupunkttemperatur

Betrachtet man die relative Feuchte und die Temperatur zwischen Mauerwerk und Innendämmung zeigt die nachfolgende Abbildung 22 über einen langen Zeitraum fast 100% relative Feuchte, d.h. an dieser Stelle fällt Tauwasser aus. In der Mitte der Innendämmung (Abbildung 23) ist die relative Feuchte geringer und die Temperaturen höher.

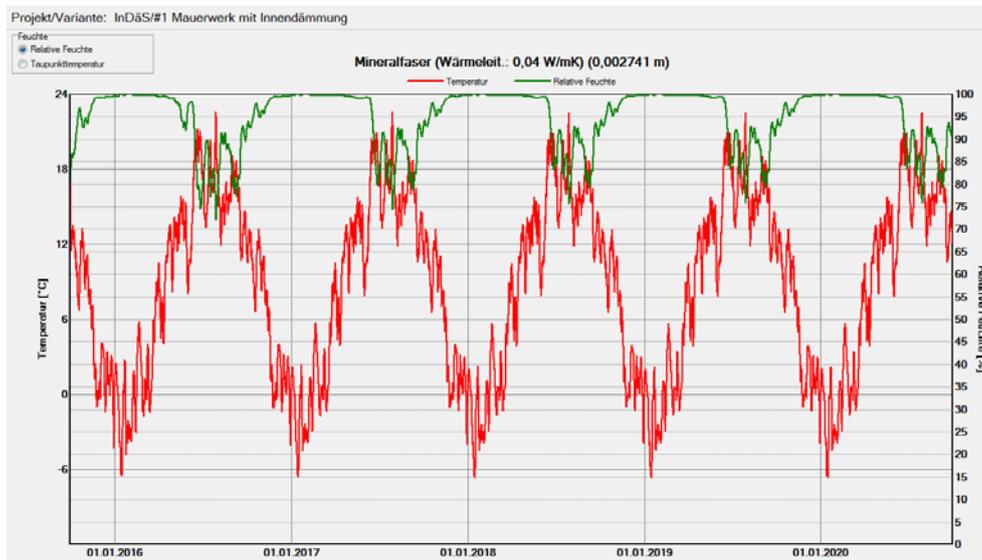


Abbildung 22: relative Feuchte (grün), zwischen Mauerwerk und Innendämmung

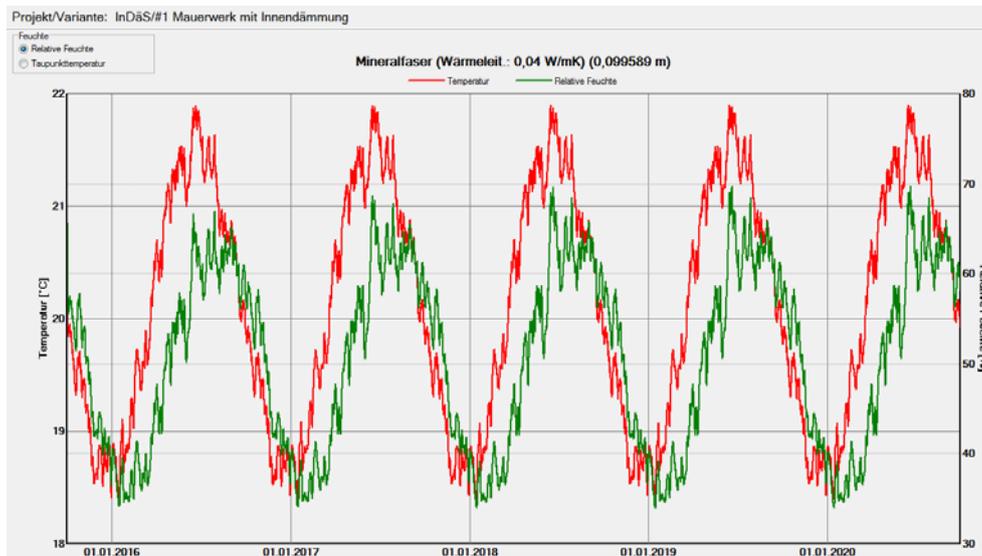


Abbildung 23: relative Feuchte zwischen Innendämmung und Putz

Ohne eine Dampfsperre fällt bei oben gewähltem Aufbau des Innendämmsystems in der Innendämmung an der Seite zur Außenwand Tauwasser aus. Der Einbau einer Dampfsperre ist notwendig.

#### 4.2.2 Variante 2: Innendämmung mit Dampfsperre ohne PCM

Es wurde der oben beschriebene Aufbau um eine weitere Schicht (Dampfsperre) erweitert. Die Dampfsperre befindet sich zwischen der Innendämmung und dem Innenputz. Sie weist eine Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu = 100000$  und eine wasserdampfäquivalente Luftschichtdicke von  $s_d = 100$  m auf. Abbildung 24 zeigt den schematischen Aufbau dieser Variante.

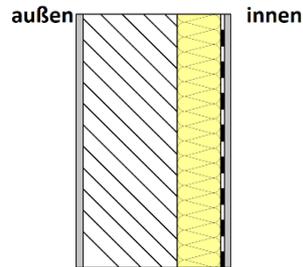


Abbildung 24: schematischer Aufbau Variante 2

Hier wird die kritischste Stelle betrachtet: an der Innendämmung zum Mauerwerk. In der in Abschnitt 4.2.1 dargestellten Konstellation ergab sich hier ein Tauwasserausfall. Dies wird durch den Einbau der Dampfsperre verhindert. Abbildung 25 zeigt die Temperatur und die Taupunkttemperatur an der kritischen Stelle, Abbildung 26 die relative Feuchte sowie die Temperatur. Die relative Feuchte ist durch die Dampfsperre deutlich verringert.

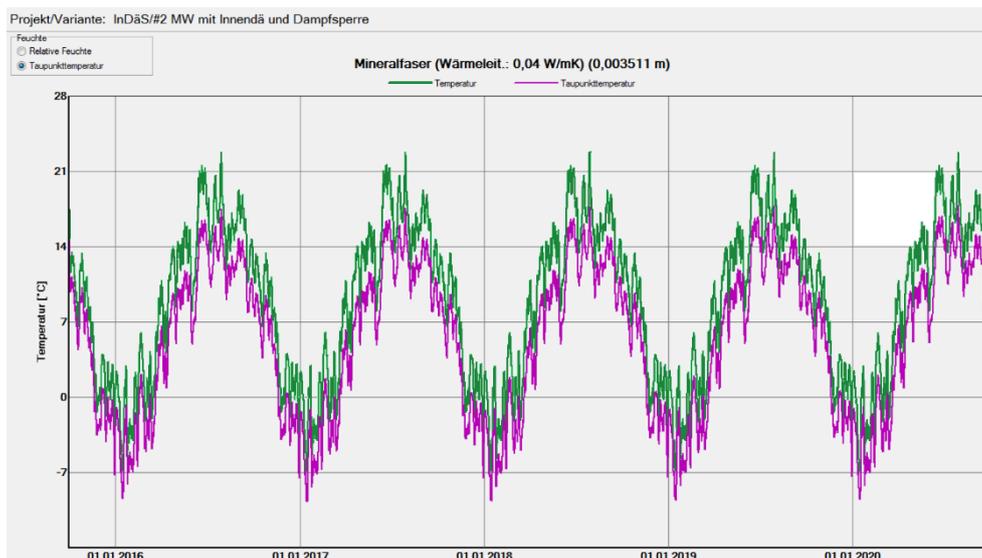


Abbildung 25: Temperaturen zwischen Mauerwerk und Innendämmung mit Dampfsperre

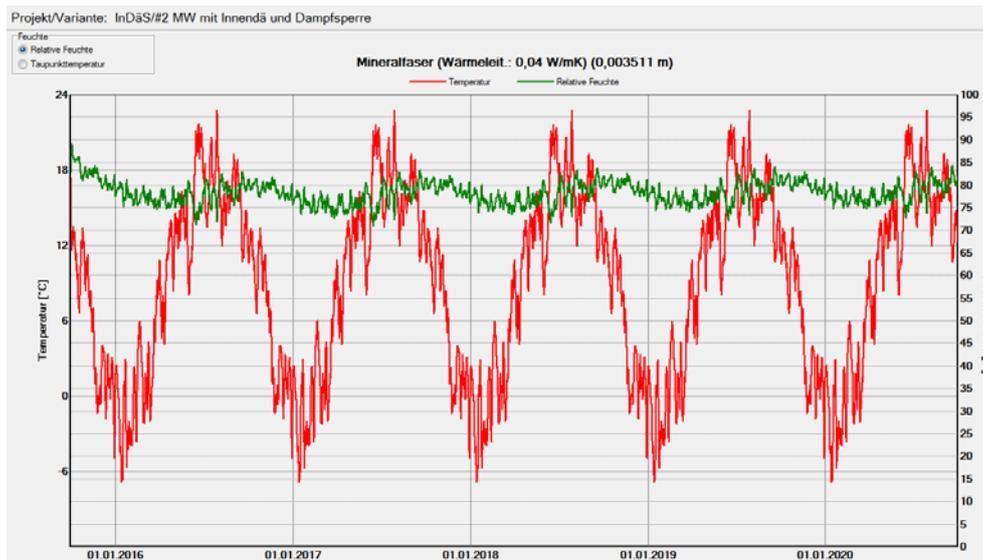


Abbildung 26: Relative Feuchte zwischen Mauerwerk und Innendämmung mit Dampfsperre

#### 4.2.3 Variante 3: Innendämmung und Innenputz mit PCM

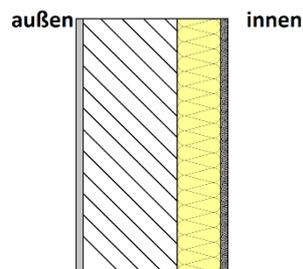


Abbildung 27: schematischer Aufbau Variante 3

Der Aufbau entspricht dem von Variante 1 (vgl. Abschnitt 4.2.1), der Innenputz wurde durch einen Innenputz mit PCM mit einer PCM-Konzentration von 25% ausgetauscht (Abbildung 27). Auch hier betrachten wir die hinsichtlich der Bildung von Tauwasser kritischste Stelle zwischen Mauerwerk und Innenputz.

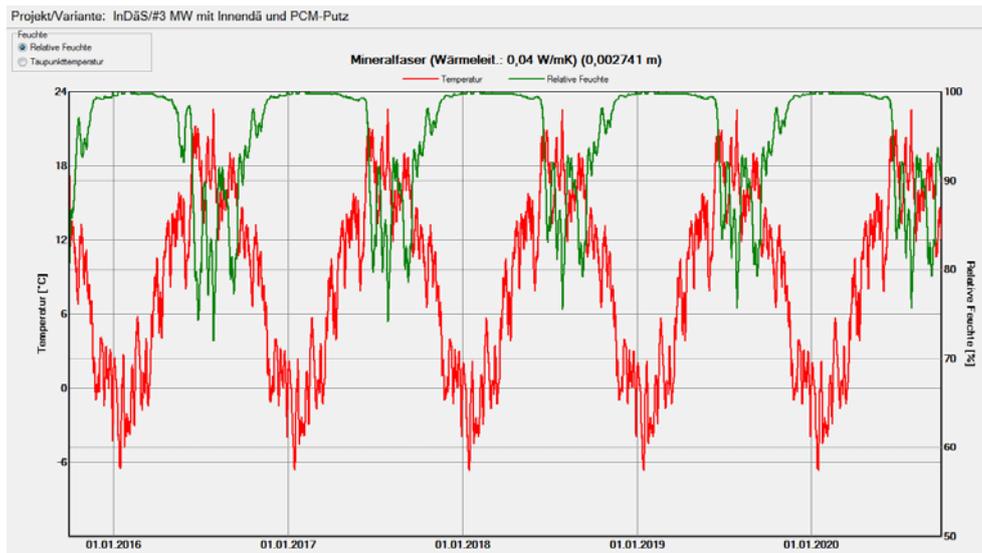


Abbildung 28: relative Feuchte zwischen Mauerwerk und Innendämmung, PCM-Putz

#### 4.2.4 Hygrothermische Detaillösung des Innendämmsystem-Aufbaus

Abbildung 29 zeigt die relative Feuchte zwischen Innendämmung und Mauerwerk für die beiden Systeme mit und ohne PCM. Der PCM-Anteil hat gemäß dieser Abbildung keine Auswirkung auf die hygrothermischen Eigenschaften des Innendämmsystems, die Werte sind identisch. Die blaue (Variante 1: Mauerwerk mit Innendämmung) und die graue Linie (Mauerwerk mit Innendämmung und PCM-Putz) liegen übereinander.

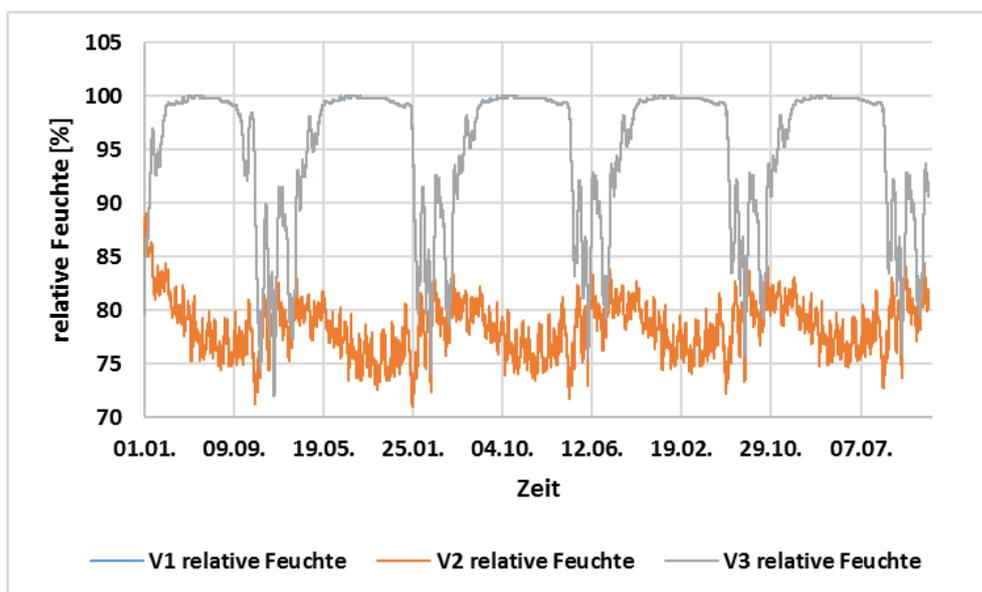


Abbildung 29: Vergleich der Varianten mit relativer Feuchte

Die Simulation zeigt bei beiden Systemen hohe relative Feuchten am Mauerwerk, da die Feuchtigkeit aus dem Innenraum durch die Mineralwoll-Dämmung diffundieren kann. Da die massive Wand durch die Innendämmung von Innenraum thermisch getrennt ist, sind die Wandtemperaturen niedrig und

es kann zu Tauwasserbildung führen. Daher sind weitere Maßnahmen zur Sicherstellung des Feuchteschutzes beim Aufbau des geplanten Innendämm-Systems zu treffen. Dabei sind die bei marktgängigen Innendämmsystemen ohne PCM klassischen Verfahren, wie zum Beispiel der Einbau einer Dampfsperre geeignet.

#### 4.3 Verwendung von gemessenen Innenraumklimata aus dem Projekt „Entwicklung Referenzinnenraumklima“

Während für das Außenklima langjährige Messungen für die meisten Städte vorliegen, wurde das Innenraumklima bisher nur grob erfasst. Bisher wird bei Simulationen des Rauminnenklimas auf stark vereinfachte Annahmen zurückgegriffen. Die derzeit vorliegenden Ergebnisse des laufenden Projekt der Deutschen Forschungsgemeinschaft „Entwicklung eines Referenzinnenraumklimas und eines instationären Berechnungsverfahrens für die wärmetechnische Planung und Beurteilung von Gebäuden“ von der TU Kaiserslautern (Kornadt & Hofmann, 2010) werden hier verwendet, um die Simulation zu verfeinern. Dabei liegen für eine Vielzahl von Wohnungen Messdaten aus Wohn- und Schlafzimmern vor. Für die folgenden Simulationen wurden gemessene Innenraumklimata (Temperatur und Luftfeuchte) verwendet. Dazu wurden die Daten eines Schlafzimmers gewählt, das teilweise auch tagsüber genutzt wurde, weshalb von einem erhöhten Feuchteeintrag ausgegangen werden kann. Die Messdaten sind in Abbildung 30 dargestellt.

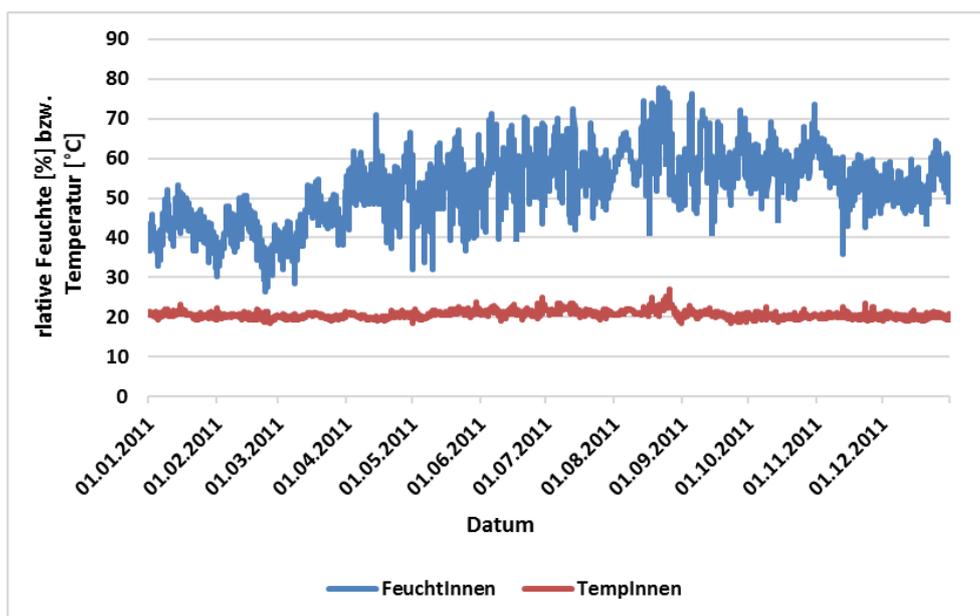


Abbildung 30: gemessenes Innenraumklima "Schlafzimmer"

Zusätzlich wird das normative Innenraumklima nach dem WTA-Merkblatt 6-2-01 „Raumklimabedingungen, normale Feuchtelast“ verwendet (Abbildung 31).

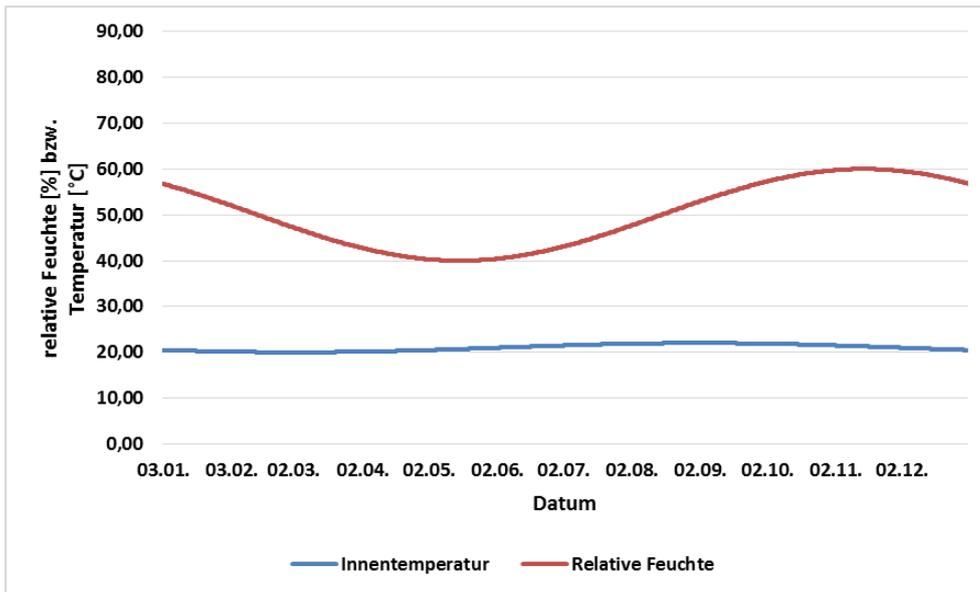


Abbildung 31: normatives Innenraumklima

Die innen und außen gemessenen Werte der Temperatur und der relative Feuchte wurden in die WUFI-Simulation mit der oben vorgestellten Wandkonstruktion Variante 1 (Außenputz, Mauerwerk, Dämmung, Innenputz) eingespielt. Betrachtet wird hier der kritische Punkt zwischen Mauerwerk und Innendämmung (Abbildung 32, 33). Es sind vier Jahre dargestellt.

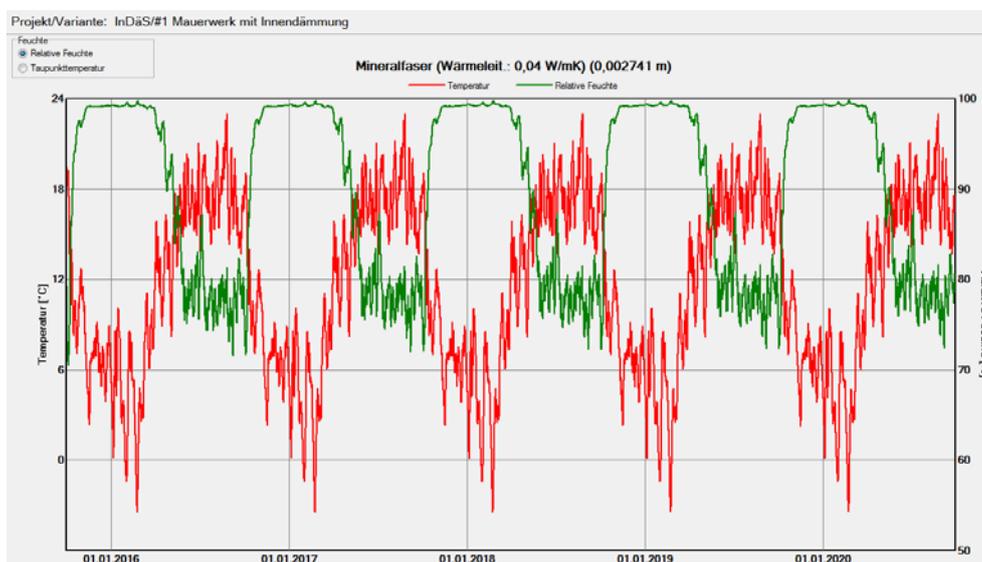


Abbildung 32: relative Feuchte zwischen Mauerwerk und Innendämmung, gemessene Klimadaten

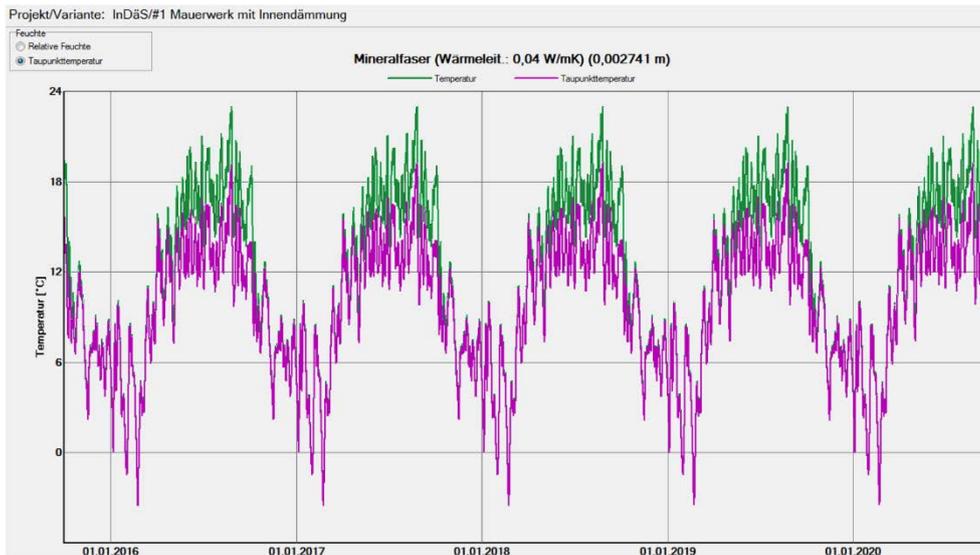


Abbildung 33: Temperatur zwischen Mauerwerk und Innendämmung, gemessene Klimadaten

Die mit dem gemessenen Innenraumklima berechneten Werte für die Bauteiltemperatur des Dämmmaterials unterschreiten leicht die mit normativen Bedingungen berechneten Werte, d.h. die Gefahr eines Tauwasserausfalls ist mit realistischen Werten geringer. Mit Verwendung des normativen Innenraumklimas bleibt man auf der sicheren Seite (Abbildung 34).

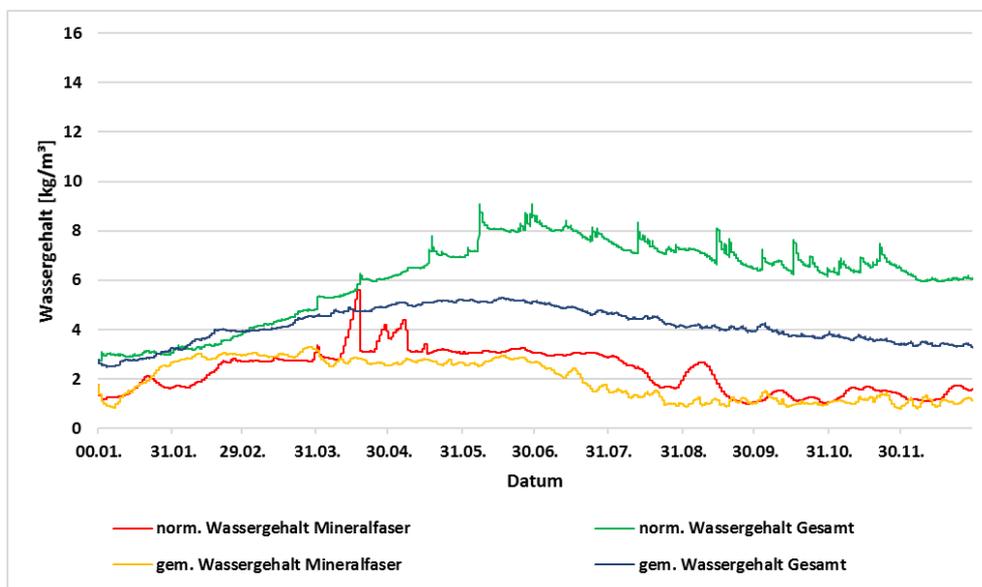


Abbildung 34: Vergleich des Wassergehalts unter normativen und gemessenen Innenraumklimata

## 5 Gebäudesimulationen

### 5.1 Aufbau des Testraums zur Vorbemessung

Die Simulationen wurden durch die TU Kaiserslautern zur Untersuchung des Einflusses von PCM auf das Raumklima mithilfe des Programms „TRNSYS“ durchgeführt. Es wurde ein Testraum mit den nachfolgenden Bedingungen erstellt und analysiert.

Randbedingungen der Simulation:

- Klimadaten: Meteonorm Stuttgart-Echterdingen
- Innere Lasten: 100 W
- Keine Verschattung
- Verglasung:  $U = 2,83 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $g = 0,755$
- Wandaufbau:
  - Vollziegelmauerwerk  $d=36 \text{ cm}$ ;  $\lambda = 1 \text{ W/mK}$
  - Dämmung,  $d$  und  $\lambda$  variabel
  - Putz mit PCM,  $d$  und  $\lambda$  variabel

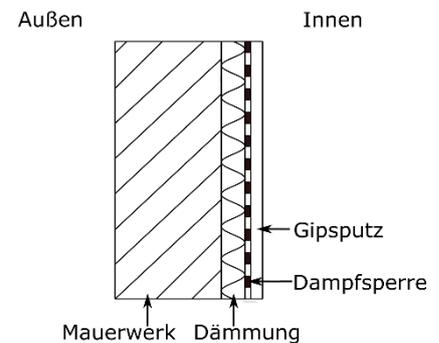


Abbildung 35: Wandaufbau Testraum

Der Schmelzpunkt des verwendeten PCMs liegt bei  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ . Der PCM-Anteil im Putz wurde variiert. Für die in den Abschnitten 5.2.1 bis 5.2.4 gezeigten Simulationen wurde ein PCM-Anteil von 20 % angenommen.

Der Testraum wurde so gewählt, dass besonders hohe sommerliche Überhitzung auftritt. Der Raum ist 5 m lang, 5 m breit und 3 m hoch. Er besitzt zwei Fenster mit Süd- und Westorientierung, wobei die Fensterfläche jeweils  $6.5 \text{ m}^2$  beträgt.

Es erfolgt kein Wärmefluss durch die angrenzenden Bauteile (Wand, Decken, Boden) in die benachbarten Räume.

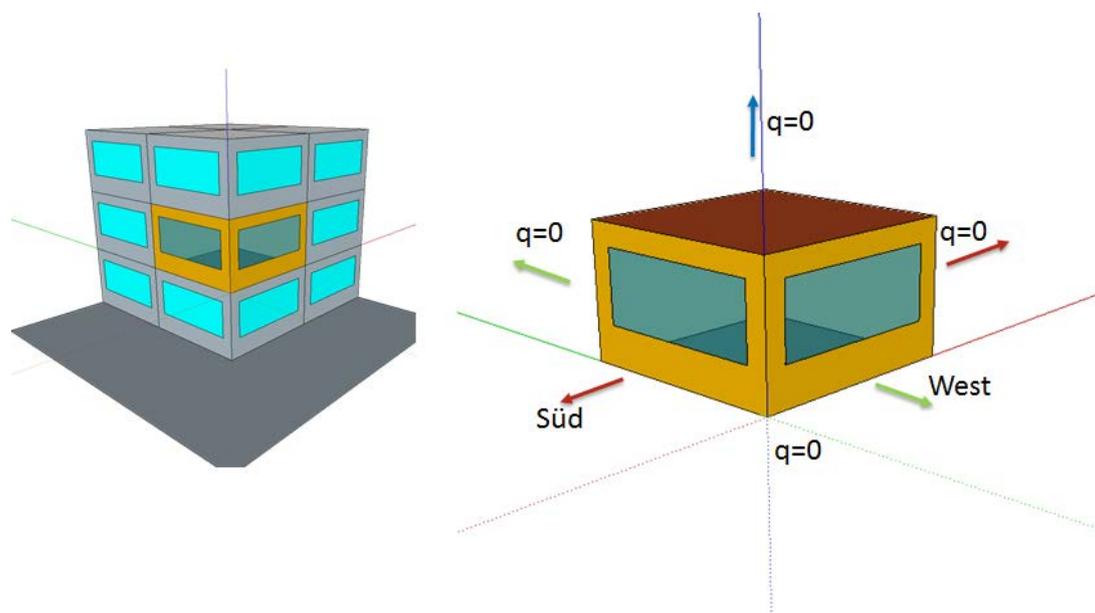


Abbildung 36: Testraum für die durchgeführte Simulation

Zur Untersuchung der sommerlichen Überhitzung wurden neben den Raumlufttemperaturen auch die Oberflächentemperaturen an den Innenoberflächen der Außenwände ausgewertet. Im Allgemeinen zeigen die Raumlufttemperaturen auf Grund der solaren Einstrahlung höhere Spitzenwerte als die Oberflächentemperaturen.

## 5.2 Ergebnisse: Untersuchung sommerliche Überhitzung

Zur Untersuchung der sommerlichen Überhitzung wurden Simulationen mit verschiedenen Lüftungen und verschiedenen Putzen durchgeführt. Es wurde immer ein ganzes Jahr simuliert und analysiert. Für die grafische Darstellung in den Kapiteln 5.2.1 bis 5.2.4 wurde ein Zeitraum im Sommer (10.08. bis 12.08.) gewählt in dem es zu sommerlicher Überhitzung kommt. Für die Auswertung der Über-temperaturgradstunden (5.2.5) wurde das gesamte Jahr betrachtet.

### 5.2.1 Raum- und Oberflächentemperaturen

Der Schwerpunkt der durchgeführten Simulationen lag auf der Untersuchung der sommerlichen Überhitzung. Es konnte gezeigt werden, dass dem Verlust der thermischen Speichermasse bei der Benutzung von IDS mithilfe von PCM-haltigen Materialien entgegengewirkt werden kann. Abbildung 37 zeigt ein Beispiel für die Effektivität des PCM. Dabei wurde der Testraum mit Außendämmung und mit Innendämmung simuliert und verglichen. Aufgrund der fehlenden thermischen Speichermasse erhöht sich die maximale Innen-Oberflächentemperatur der Außenwände mit Innendämmung um ca. 4 K mehr als mit Außendämmung auf bis zu 38 °C. Bei der Verwendung von PCM kann diese Temperatur auf etwa 34 °C reduziert werden, was in etwa dem mit Außendämmung erzielten Wert entspricht.

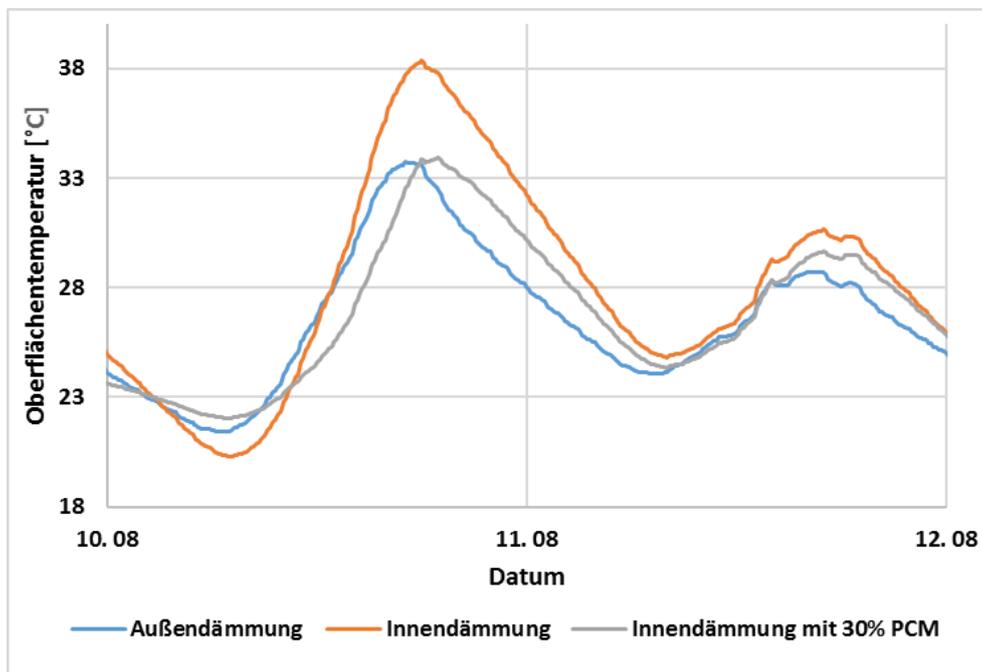


Abbildung 37: Oberflächentemperaturen mit verschiedenen Dämmarten

In den Simulationen wurde der Einfluss verschiedener Parameter auf die sommerliche Überhitzung untersucht:

## 5.2.2 Luftwechselrate und verschiedene Arten der Lüftungssteuerung

Um die Speicherfähigkeit des PCM nutzen zu können, muss das bei hohen Temperaturen geschmolzene PCM bei tieferen Temperaturen wieder entladen werden. Dieser Effekt hängt stark vom Lüftungsverhalten ab. Deshalb wurden verschiedene Lüftungsarten mit unterschiedlichen Luftwechselraten untersucht.

Zunächst wurde der Effekt der temperaturgesteuerten Lüftung und der zeitgesteuerten Lüftung verglichen. Die temperaturgesteuerte Lüftung erfolgt sobald die Innentemperatur die Außentemperatur übersteigt. Die zeitgesteuerte Lüftung hingegen ist nur von 19:00 Uhr bis 7:00 Uhr in Betrieb. Es wurde gezeigt, dass eine temperaturgesteuerte Lüftung, im Vergleich zu einer zeitgesteuerten Lüftung, die Überhitzung stärker reduzieren kann. Abbildung 37 zeigt diesen Effekt für die Raumlufttemperatur.

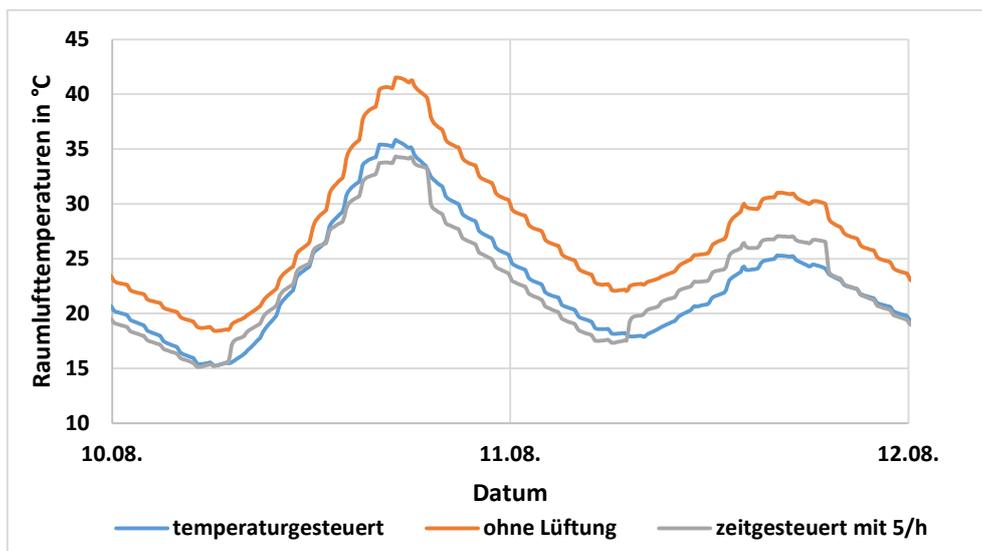


Abbildung 38: Raumlufttemperatur mit verschiedenen Lüftungsvarianten

Des Weiteren wurde der Effekt verschiedener Luftwechselraten betrachtet. Das Temperaturverhalten im Fall von zeitgesteuerter Lüftung mit verschiedenen Luftwechselraten wird in den nachfolgenden Abbildungen 39 (Lufttemperaturen) und 40 (Oberflächentemperaturen) gezeigt. Die Zeiträume mit aktivierter Lüftung sind in beiden Grafiken grau hinterlegt. Für die Luftwechselraten von 1/h bis 5/h ist der Temperaturunterschied größer als bei den Luftwechselraten von 6/h bis 10/h. Die Oberflächentemperaturen weisen im Vergleich zur Raumlufttemperatur geringfügig geringere Spitzenwerte auf. Der maximale Temperaturunterschied der Oberflächentemperaturen für die Luftwechselraten von 1/h bis 20/h beträgt in etwa 7 K.

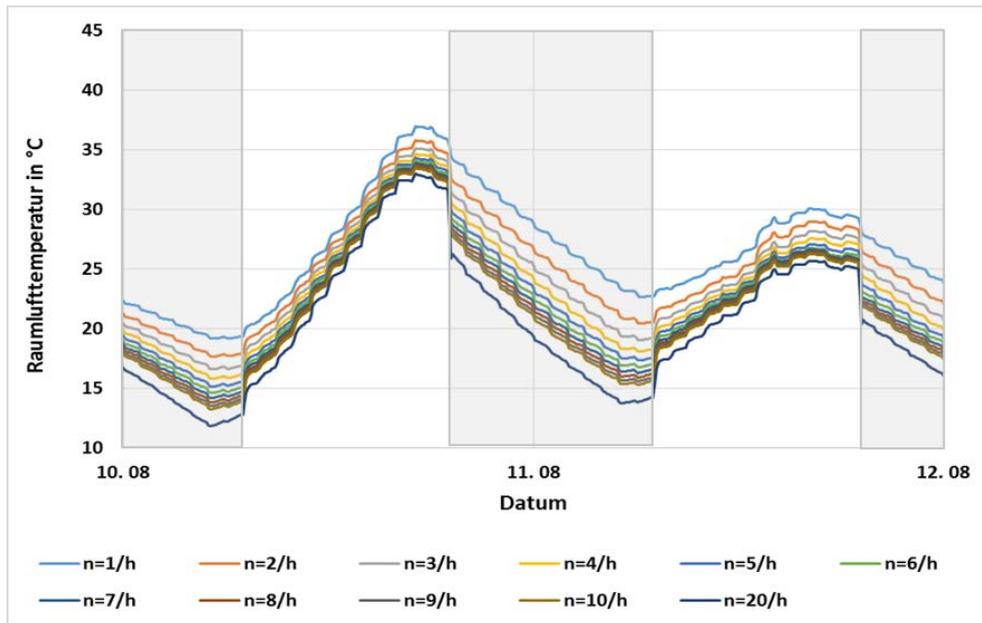


Abbildung 39: Raumlufttemperaturen mit variierenden zeitgesteuerten Luftwechselraten

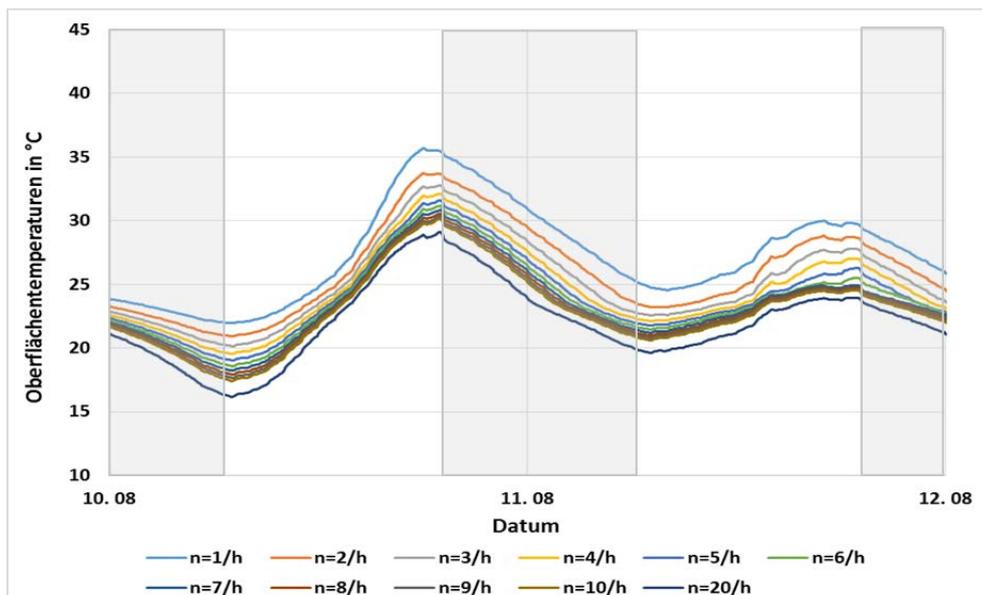


Abbildung 40: Oberflächentemperatur mit variierenden zeitgesteuerten Luftwechselraten

### 5.2.3 Schichtdicke des PCM- Putzes

Die nachfolgenden Abbildungen 41 (Raumlufttemperatur) und 42 (Oberflächentemperatur) zeigen die sich einstellenden Raumluft- und Oberflächentemperaturen der Außenwände mit verschiedenen Schichtdicken des PCM-haltigen Gipsputzes. Dabei nimmt die sich einstellende Maximaltemperatur mit zunehmender Schichtdicke ab. Durch eine Erhöhung der Schichtdicke von 1 cm auf 5 cm kann eine Temperaturreduktion der Raumluft von 5 K und der Oberflächentemperaturen von 8 K erzielt werden. Die Verringerung der Raumtemperatur ist bei der Erhöhung der Schichtdicke von 1 cm auf 2 cm am größten und nimmt mit zunehmender Schichtdicke ab.

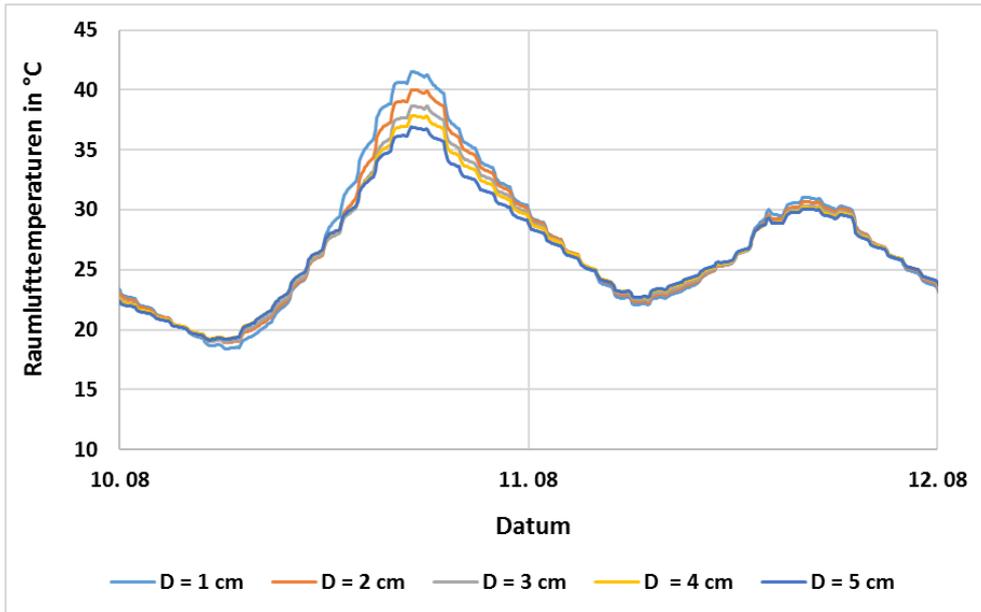


Abbildung 41: Raumlufthemperatur bei verschiedenen PCM- Putzschichtdicken

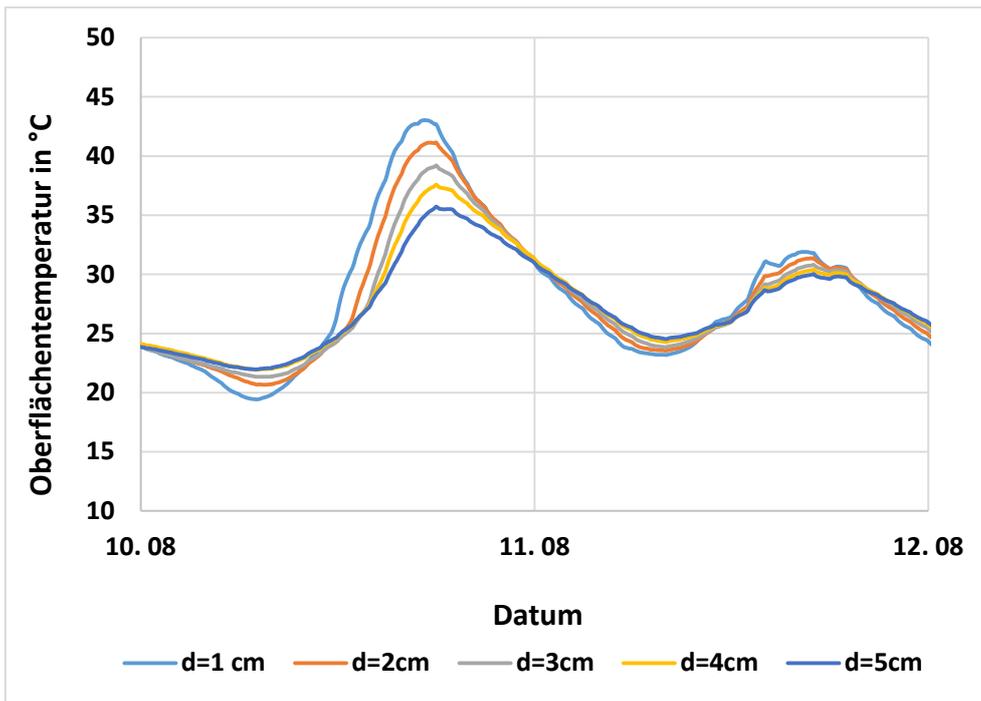


Abbildung 42: Oberflächentemperatur bei verschiedenen PCM-Putzschichtdicken

### 5.2.4 PCM-Konzentration

Als weiteres Ergebnis ergab sich eine Verringerung der maximalen Raumtemperatur durch die Erhöhung der PCM Konzentration (siehe nachfolgende Abbildungen 43 für die Raumlufttemperatur und 44 für die Oberflächentemperatur). Durch eine Erhöhung der PCM-Konzentration von 0 % auf 30 % nimmt die Maximaltemperatur der Raumluft um etwa 3 K, die der Oberflächen um etwa 5 K ab.

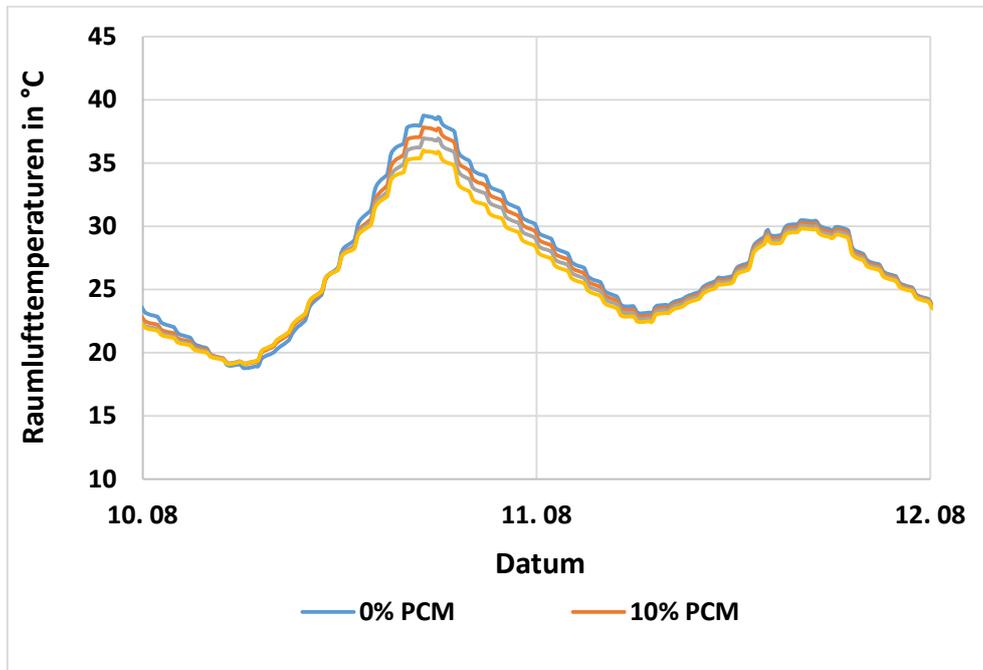


Abbildung 43: Einfluss PCM-Konzentration auf die Raumlufttemperatur

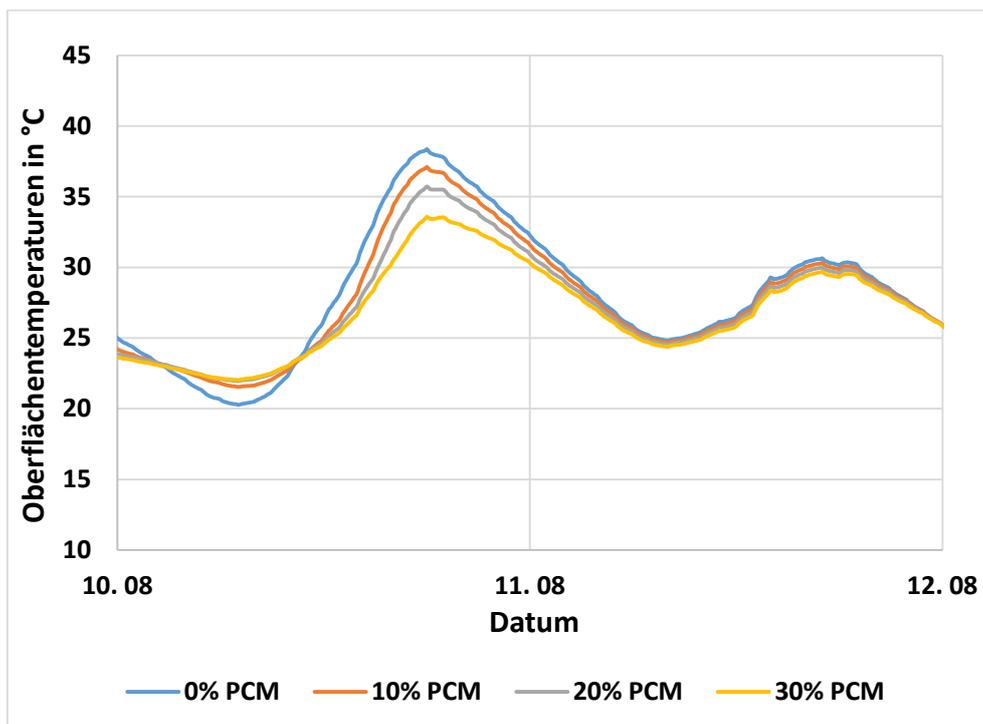


Abbildung 44: Einfluss PCM-Konzentration auf die Oberflächentemperatur

## 5.2.5 Übertemperaturgradstunden

Um die einzelnen Parameter (Dämmstoffdicke, PCM-Konzentration, PCM-Putzschichtdicke, Luftwechselrate) und deren Einfluss auf die operative Temperatur des Raumes miteinander vergleichen zu können, wurde als Kenngröße die Übertemperaturgradstunde  $\ddot{u}T_{op}$  definiert und für jede Variante berechnet. Nach (Sinnesbichler & Koller, 2009) ist in Anlehnung an DIN EN 15251 das Gradstundenkriterium definiert. Als Übertemperaturgradstunden  $Gh_x$  wird die Summe aus der Differenz der operativen Temperatur und einer bestimmten Grenztemperatur bezeichnet. Als Grenztemperatur wurde „Stuttgart-Echterdingen“ mit 26°C gewählt.

$$\ddot{u}T_{op} = \left[ \sum_{i=1}^{5161} \text{wenn} (T_{op,i} \geq 26; T_{op,i} - 26; 0) \right]$$

$\ddot{u}T_{op}$  berechnet sich als Summe einer Wenn – Dann – Beziehung, die für jeden der 5161 Zeitschritte (Sommerperiode 3.8.-31.8., 6 min Zeitschritte) überprüft, ob die operative Temperatur größer als 26°C ist. Ist dies der Fall, werden von diesem Wert 26°C abgezogen. Ist der Wert kleiner als 26°C, wird der Wert der operativen Temperatur für diesen Zeitschritt Null. Alternativ könnte die Überschreitungshäufigkeit als Kenngröße herangezogen werden. Die Überschreitungshäufigkeit ist definiert als die Zeit, in der die operative Temperatur höher als eine bestimmte Grenztemperatur ist. Diese Kenngröße hat den Nachteil, dass die Höhe der Temperaturüberschreitung nicht berücksichtigt wird (Sinnesbichler & Koller, 2009).

### Dämmstärke

Es wurden folgende Materialien ausgewählt:

Variante	$\lambda$ [W/mK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c$ [J/kgK]	Bsp. Dämmstoff
„Superisolierung“	0,02	150	1250	Aerogel
„Normaldämmung“	0,04	30	840	Mineralwolle
„Massivdämmung“	0,06	500	1000	Poro. Ziegel mit Perlitfüllung

Eine Erhöhung der Dämmstoffdicke führt zu einer Erhöhung der Übertemperaturgradstunden (fehlende Speichermasse), während eine bessere Wärmeleitfähigkeit diese leicht reduziert. Bei den größeren Dämmstärken wird die dahinterliegende Wand mit ihrer thermischen Speichermasse entkoppelt und die Wärmeleitfähigkeit spielt eine geringere Rolle. Die Übertemperaturgradstunden der Dämmung WLG 040 nähert sich der Dämmung WLG 020 bei steigender Dämmstoffdicke an. Dies ist auf die höhere thermische Speichermasse des Aerogels zurückzuführen.

Eine Erhöhung der Luftwechselrate bei dem Nachtluftwechsel (19 – 7 Uhr) reduziert die Übertemperaturgradstunden, da kältere Außenluft in den Raum bzw. wärmere Innenluft nach außen transportiert wird.

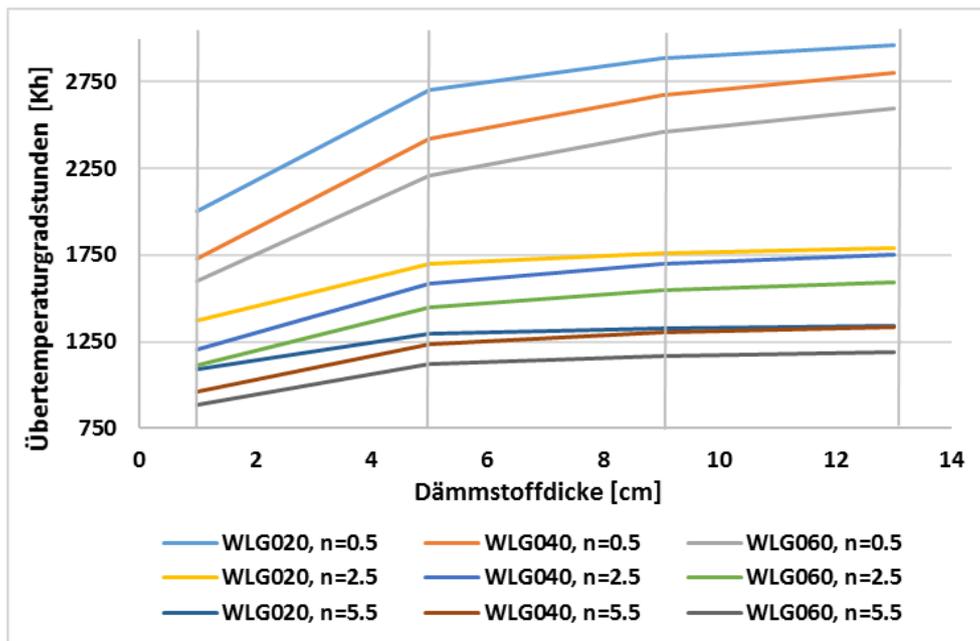


Abbildung 45: Einfluss der Dämmstärke und WL bei verschiedenen Luftwechselraten

### PCM-Putzschichtdicke

In der nachfolgenden Abbildung 46 werden die Übertemperaturgradstunden der operativen Temperatur in Abhängigkeit von der Schichtdicke bei einem Nachtluftwechsel von  $n = 0,5 \text{ h}^{-1}$  aufgetragen. Es zeigt sich, dass eine Erhöhung der Putzschichtdicke sowie der PCM-Konzentration positive Effekte zur Reduktion der Übertemperaturgradstunden haben. Bereits eine Erhöhung der Putzdicke, und damit der Speichermasse, lässt bei 0% PCM die Übertemperaturgradstunden sinken. Die ersten zwei Zentimeter erreichen so viel wie die nachfolgenden drei Zentimeter Putz. Wird PCM dem Putz zugegeben, werden die Übertemperaturgradstunden noch stärker reduziert.

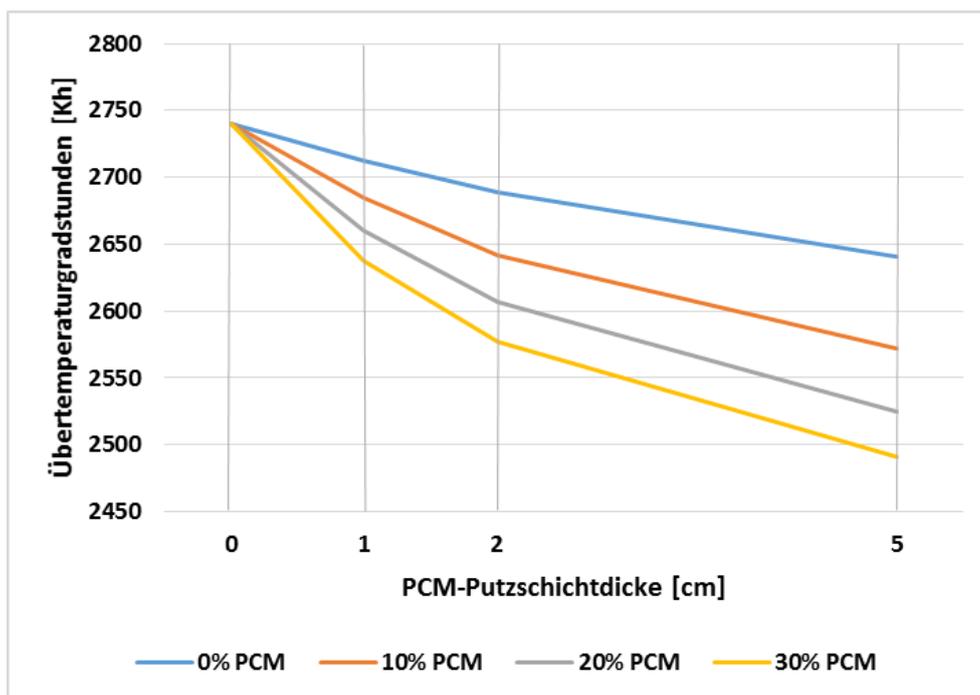


Abbildung 46: Übertemperaturgradstunden bei verschiedenen PCM-Putzschichtdicken

## Nachtlüftung

Die nächtliche Lüftung (19 - 7 Uhr) ermöglicht eine Senkung der Innenraumtemperaturen bzw. der Übertemperaturgradstunden. Zunächst sinken (wie in Abbildung 47 dargestellt) bei einer Erhöhung der Schichtdicke die Übertemperaturgradstunden (Erhöhung der Speichermasse). Wird die Luftwechselrate erhöht, erhöht sich auch die Reduktion. Allerdings erstarrt bei größeren Schichtdicken nicht das komplette PCM, hier nimmt der Reduktionseffekt ab.

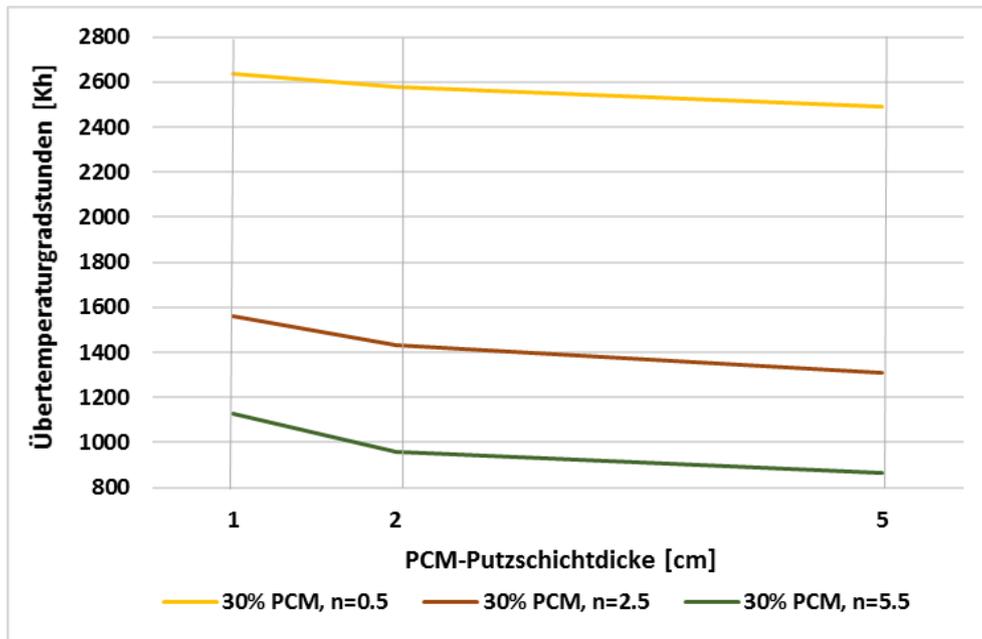


Abbildung 47: Übertemperaturgradstunden mit verschiedenen Nachtluftwechseln

## Vergleich: Übertemperaturgradstunden bezogen auf eine Außendämmung

Nachfolgend wird der Einfluss von Schichtdicke und PCM-Konzentration auf die operative Temperatur anhand der Übertemperaturgradstunden im prozentualen Vergleich zu den Übertemperaturgradstunden der Variante Außendämmung dargestellt. Dabei wurde im Falle der Außendämmung ein Dämm-Material mit derselben Stärke und derselben Wärmeleitfähigkeit wie bei der Innendämmung angenommen.

Durch Einsatz von PCM (30%) lässt sich die Differenz zu den Übertemperaturgradstunden der Variante mit Außendämmung von 40% auf unter 10% reduzieren (rote Kreise). Im Fall von einer Putzschichtdicke von 5 cm mit 30% PCM-Anteil wird sogar eine Unterschreitung der Übertemperaturgradstunden der Außendämmungsvariante von 1,84% erreicht.

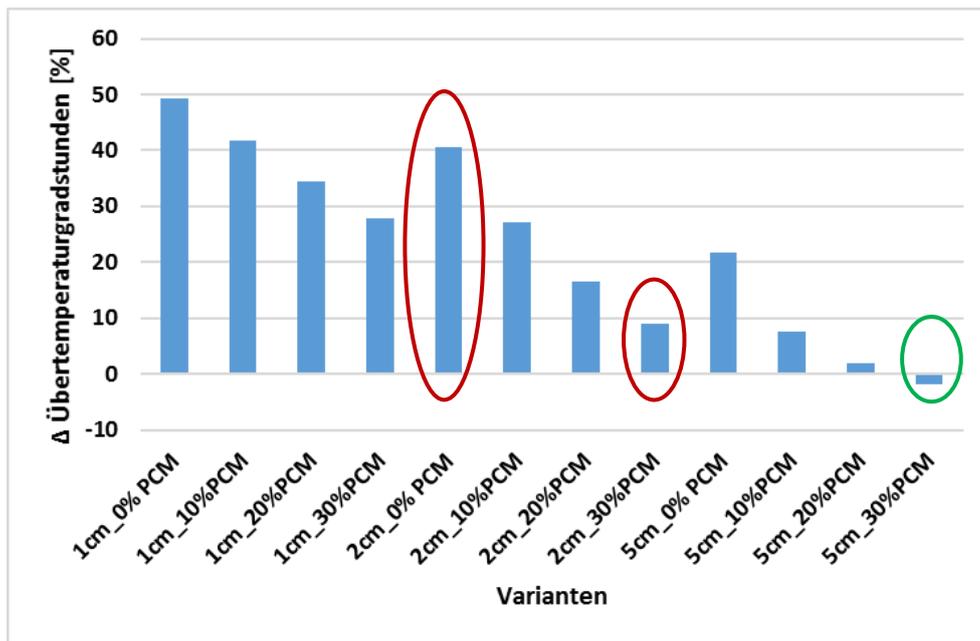


Abbildung 48: Differenz der Übertemperaturgradstunden zur Variante Außendämmung

### 5.2.6 Phasenwechsel

In dem Temperaturbereich von 22°C und 27°C wechselt das PCM seine Phase (flüssig – fest), dieser Bereich weist somit das größte Wärmespeichervermögen auf. Liegt die Temperatur der PCM-Putzschicht über diesem Bereich, befindet sich das gesamte PCM in der flüssigen Phase. Liegt die Temperatur darunter, befindet es sich in der festen Phase. Für einen wirkungsvollen Einsatz des PCM zur Pufferung hoher sommerlicher Temperaturen ist es notwendig, dass die Schichttemperatur möglichst häufig den Bereich der Schmelz-/ Erstarrungstemperaturen durchläuft bzw. dass ab den Morgenstunden möglichst die gesamte PCM-Kapazität zur Verfügung steht. Dies bedingt, dass sich das PCM in der davorliegenden Nacht vollständig „entladen“ kann.

Nachfolgende Abbildung 49 zeigt den Phasenzustand des PCM. Hierbei bedeutet ein Wert von  $Ph_{pcm}=0$ , dass sich alles PCM in der festen Phase befindet. Bei einem Wert von  $Ph_{pcm}=1$  ist alles PCM flüssig (100%), die Werte dazwischen geben prozentual an, wieviel PCM im geschmolzenen Zustand vorliegt. Es sind verschiedene PCM-Konzentrationen dargestellt: bei 10% PCM wird dieses wieder schneller fest, bei 30% dauert die Verfestigung etwas länger. Insgesamt ist das PCM bei allen Konzentrationen in ca. 40% der Zeit in der flüssigen Phase.

Hinweis: Die Simulation wurde mit einer automatischen Heizfunktion durchgeführt, die ein Absinken der Raumtemperatur unter 15°C ausschließt. Die Dicke der PCM-Putzschicht betrug 2 cm und die Luftwechselrate 2,5 h<sup>-1</sup>.

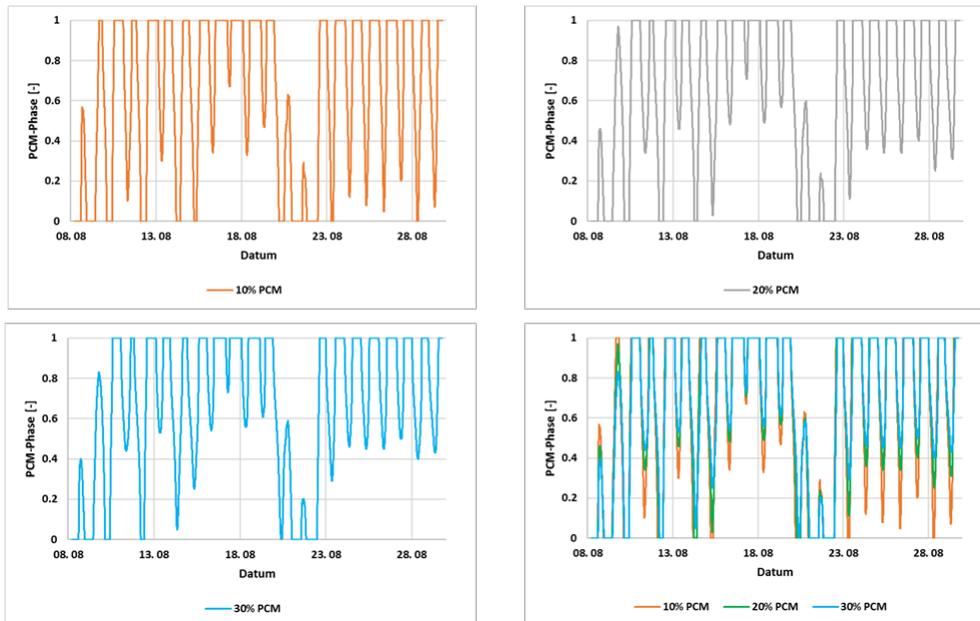


Abbildung 49: Phasenzustand PCM bei verschiedenen PCM-Konzentrationen

### 5.3 Ergebnisse: Übergangszeit (Herbst)

Um die Fragestellung ob PCM in der Übergangszeit geeignet ist, um das Auskühlen des Gebäudes zu verlangsamen nachzugehen, wurden Simulationen durchgeführt. Raumgeometrie, Annahmen zur Nutzung etc. sind die gleichen, wie bei der Simulation der sommerlichen Überhitzung. Es wurde ein Raum mit geringer thermischer Speichermasse gewählt, damit ein möglicher Effekt durch das PCM besonders gut sichtbar wird. Als Klimadatensatz kam eine Woche Ende September / Anfang Oktober der Station Berlin-Tempelhof zum Einsatz. Diese Woche ist besonders geeignet, um den Effekt von PCM in der Übergangszeit zu untersuchen. Wie in Abbildung 50 zu erkennen, folgt auf vier warme Tage ein Kälteeinbruch gefolgt von einem erneuten leichten Ansteigen der Temperaturen.

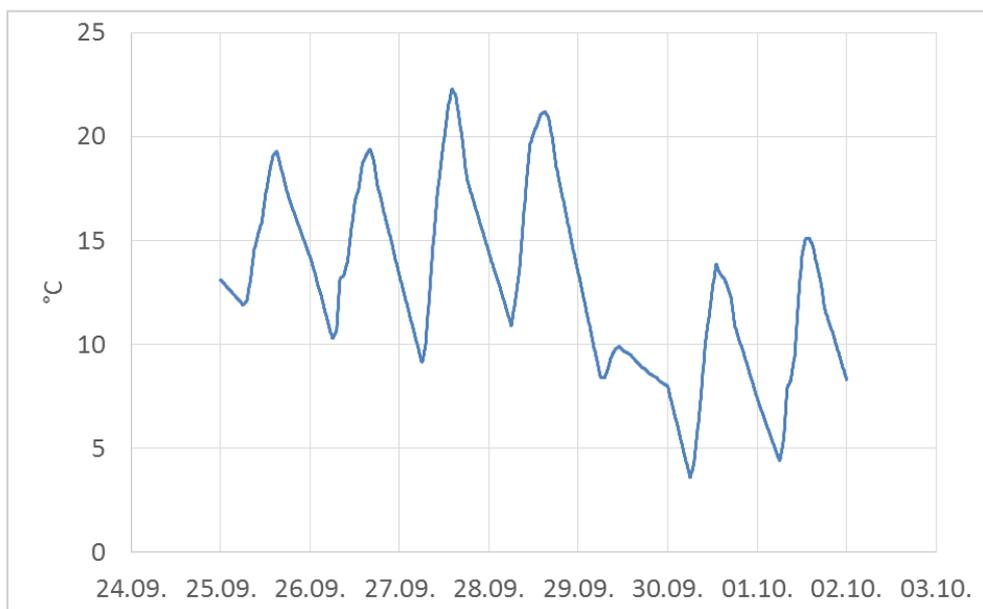


Abbildung 50: Verwendetes Außenklima

Mit diesen Randbedingungen wurde der Raum mit vier verschiedenen Innenputzschichtdicken (0 cm, 1 cm, 3 cm, 5 cm), sowohl mit PCM als auch ohne PCM, simuliert. Zum Einsatz kam ein PCM mit

Schmelzpunkt 21°C. Die größte freiwerdende Energiemenge beim Erstarren ist somit im Bereich von 18°C bis 20°C zu erwarten, also einem noch tolerierbaren Temperaturbereich von Innenoberflächentemperaturen in der Übergangszeit.

Ein Vergleich aller simulierten operativen Temperaturen ist in Abbildung 51 dargestellt. Gleiche Putzschichtdicken sind durch gleiche Farbe kenntlich gemacht. Die Putze mit PCM Anteil sind durch gestrichelte Linien gekennzeichnet.

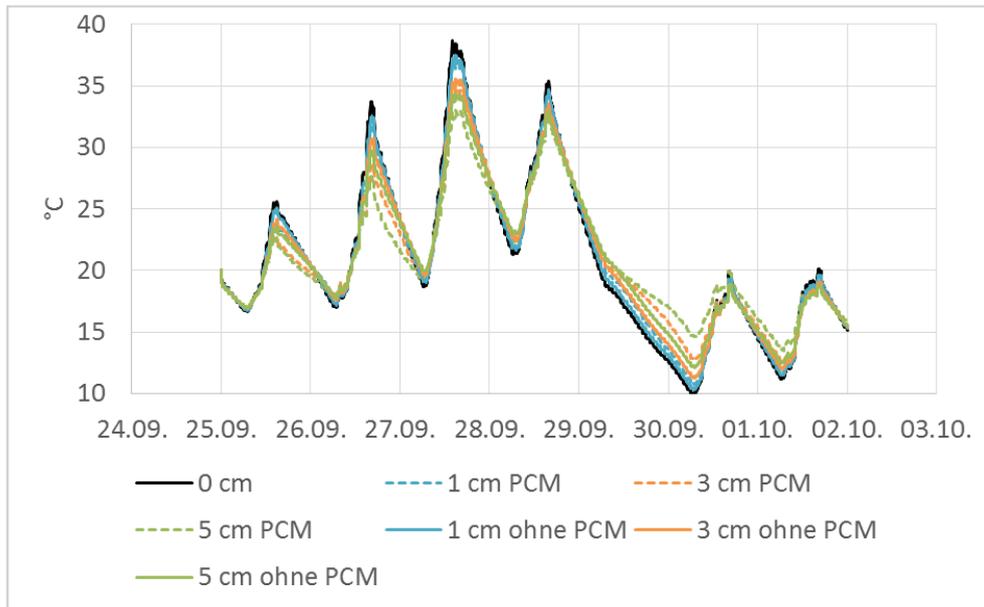


Abbildung 51: Operative Temperaturen für verschiedene Putze

Abbildung 52 zeigt einen Detailausschnitt von Abbildung 51. Es wird ersichtlich, dass die Verwendung von PCM einen sichtbaren Effekt auf die operative Temperatur des Raums hat. Bis zum Erstarrungsbeginn des PCM verlaufen die operativen Temperaturen annähernd parallel. Ab Unterschreitung dieses Punktes sinken die operativen Temperaturen des Raums mit PCM haltigen Putz langsamer als die des Raums mit normalen Putz.

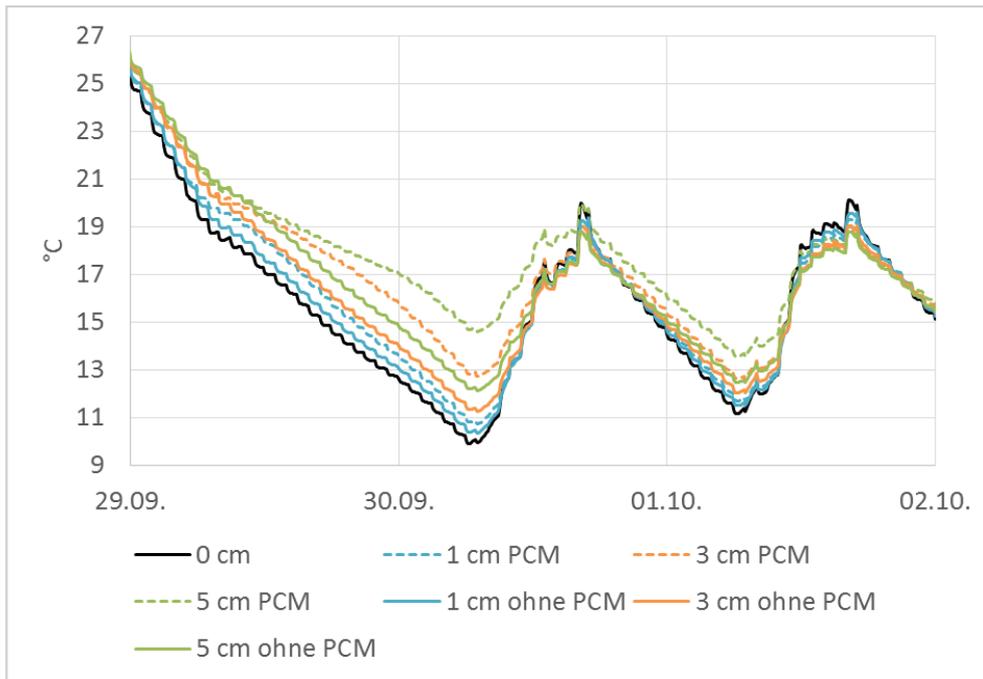


Abbildung 52: Operative Temperaturen für verschiedene Putze, Detailansicht

Um die sich aus diesem Effekt ergebende Einsparung an Heizenergie zu ermitteln, wurde für diesen Kälteeinbruch die Wärmemenge bestimmt, die von den Speichermassen an den Raum abgegeben wurde. Dazu wurde das Integral über das Produkt aus Speicherkapazität des Raumes mit der zeitlichen Änderung der Temperaturdifferenz über den Zeitraum des Kälteeinbruchs, in dem sich eine merkliche Abweichung der operativen Temperatur des Innenraums durch das PCM ergibt, gebildet:

$$\int_{29.09.(12:00)}^{02.10.(06:20)} c \cdot \Delta\theta \, dt$$

Die wichtigsten Ergebnisse der Rechnung sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die erzielbaren Einsparungen bewegen sich im Bereich von 0,05 kWh/m<sup>2</sup> bis hin zu 0,16 kWh/m<sup>2</sup>. Bezogen ist diese Einsparung auf einen Kälteeinbruch nach einer Warmphase. Verglichen mit dem Jahresheizwärmebedarf für den Raum beträgt die Einsparung zwischen -0,08 % und 0,48 %.

Tabelle 1: Heizenergieeinsparung durch PCM

Putzdicke	Thermische Speicherkapazität	Einsparung in kWh	Einsparung in kWh/m <sup>2</sup>
1 cm	2550 kJ/K	-2,4	-0,1
3 cm	3450 kJ/K	5,3	0,2
5 cm	4350 kJ/K	15,5	0,6

Die hier getroffenen Randbedingungen können allerdings als nicht wirklich realistisch angesehen werden. Es muss unter realistischen Bedingungen davon ausgegangen werden, dass Temperaturen von fast 40°C vom Nutzer nicht toleriert werden und dementsprechend Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Deshalb wurden die Randbedingungen modifiziert. Es wurde eine externe Verschattung berücksichtigt, und es wurde davon ausgegangen, dass der Nutzer lüftet, sobald es im Raum zu warm wird. Abbildung 53 und 54 zeigen den Temperaturverlauf für Räume mit den angepassten Randbedingungen.

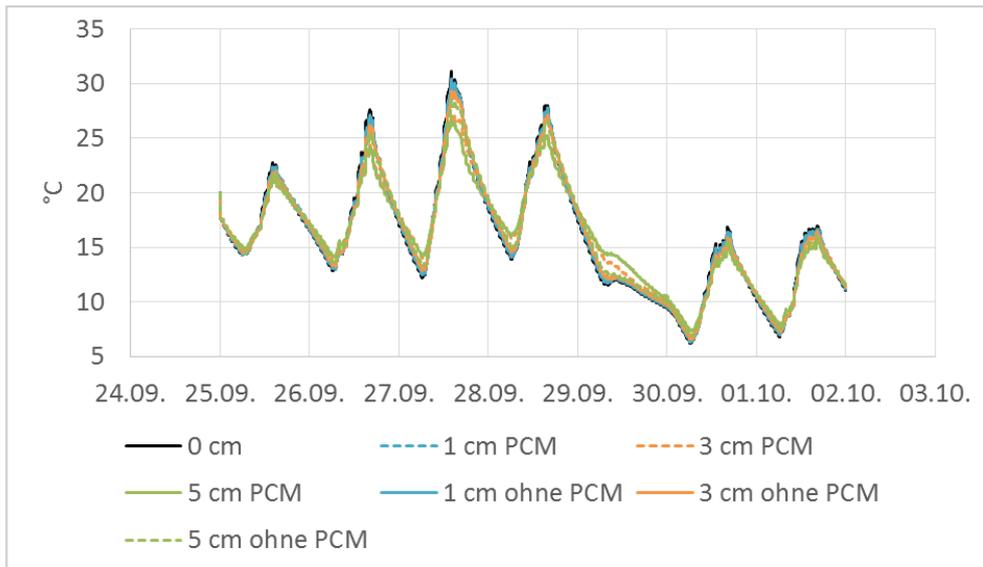


Abbildung 53: Operative Temperaturen bei angepasster Gebäudenutzung für verschiedene Putze

Mit diesen Randbedingungen wäre es zwingend erforderlich, das Gebäude in der anschließenden Kälteperiode zu beheizen. Unter Annahme derselben thermischen Speichermasse des Raumes ergeben sich die in Tab. 2 dargestellten Heizenergieeinsparungen. Verglichen mit dem Jahresheizenergiebedarf ergeben sich nun Heizenergieeinsparungen zwischen 0% und 0,2%.

Tabelle 2: Heizenergieeinsparung durch PCM bei realistischen Nutzerprofilen

Putzdicke	Thermische Speicherkapazität	Einsparung in kWh	Einsparung in kWh/m <sup>2</sup>
1 cm	2550 kJ/K	0,2	0,01
3 cm	3450 kJ/K	2,1	0,09
5 cm	4350 kJ/K	6,6	0,26

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich zwar Heizenergie durch die Verwendung von PCM in der Übergangszeit einsparen lässt, der Effekt jedoch unter Zugrundelegung realistischen Nutzerverhaltens sehr gering ist.

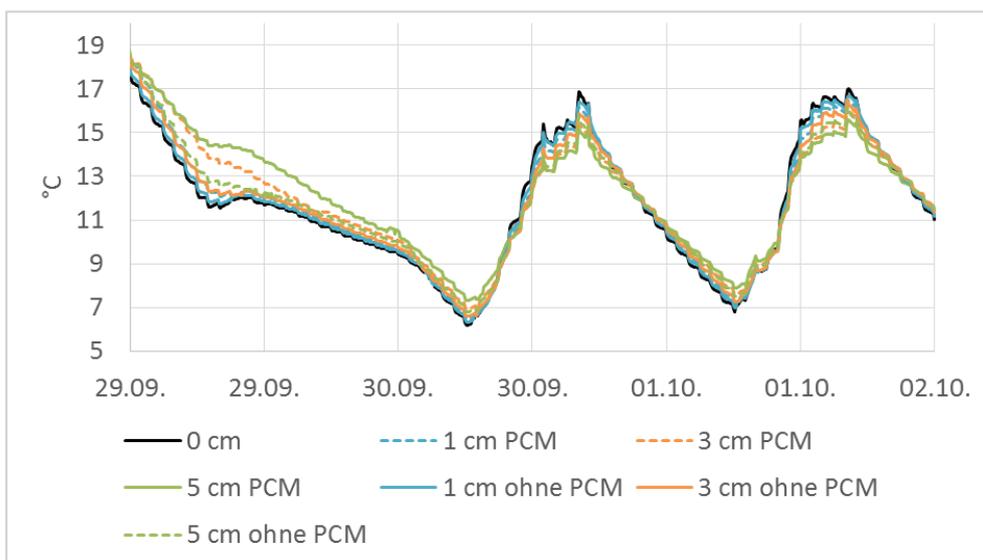


Abbildung 54: Operative Temperaturen bei angepasster Gebäudenutzung für verschiedene Putze, Detailansicht

## 5.4 Einfluss des Standorts

Die Ergebnisse dieses Projektes sind auch auf andere Standorte übertragbar. Die Temperaturabweichungen in den verschiedenen Jahren sind üblich, daher ist das System nicht auf eine exakte Temperatur optimiert wurde. Es wurde die Schalttemperatur 23°C ausgewählt.

Um den unterschiedlichen Einfluss der Standorte näher zu untersuchen, wurden die Wetterdaten in TRNSYS für oben vorgestelltes Modell variiert. Es wird der Sommerzeitraum näher betrachtet und drei Standorte verglichen. Neben dem bereits zuvor verwendeten Datensatz warmen Klima in Stuttgart-Echterdingen, wurde ein Seeklima in List, Sylt und ein kühlgemäßigtes Klima in Passau (Meteonorm-Datensätze) ausgewählt. Untersucht wird hierbei eine Wand mit Innendämmung sowie PCM-Innenputz (30% PCM-Anteil). Die Standorte List und Passau sind etwas wärmer als der Standort Stuttgart-Echterdingen, erreichen aber auch die Temperatursenken zur Regeneration des PCM (23°C). Dies zeigt, dass ein Einsatz des ausgewählten Systems auch an anderen Standorten möglich ist. Die Schalttemperatur des PCMs kann bei größeren Unterschieden der Innenraumtemperatur des gewünschten Raums auch angepasst werden.

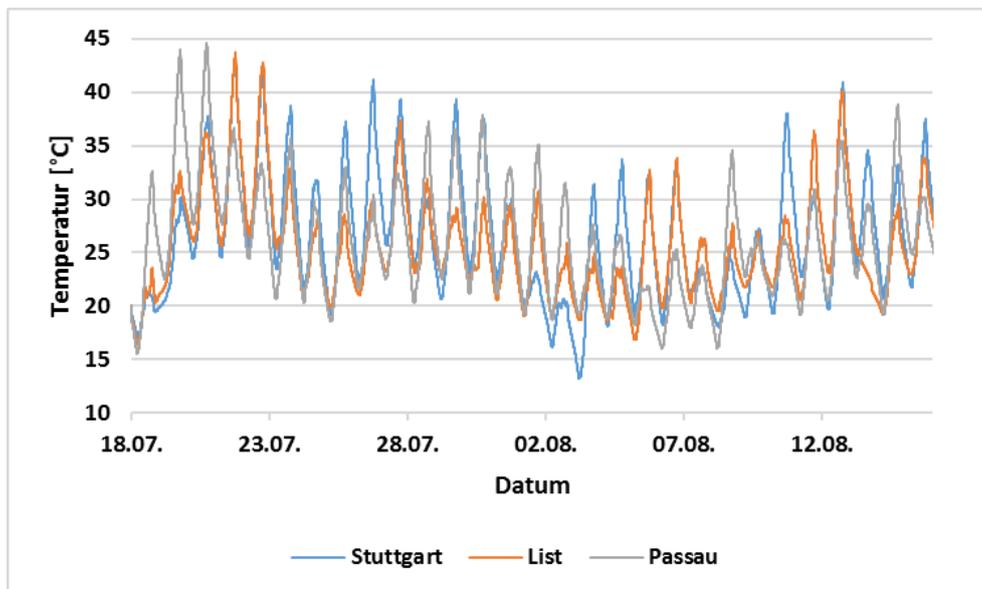


Abbildung 55: Vergleich Raumtemperatur verschiedene Standorte PCM-Wand

## 5.5 Simulation der Testwände

Im Rahmen des Projekts wurden Testwände zur Untersuchung des entwickelten Systems unter realen Klimabedingungen errichtet (s. Kapitel 6). Diese wurden außerdem in der Simulationssoftware TRNSYS simuliert und die Ergebnisse mit den tatsächlich gemessenen Daten verglichen. Hier wird die Testwand Mauerwerk dargestellt, die Ergebnisse weisen eine recht gute Übereinstimmung auf. Der Temperaturanstieg wird durch die aktivierten Wärmequellen verursacht.

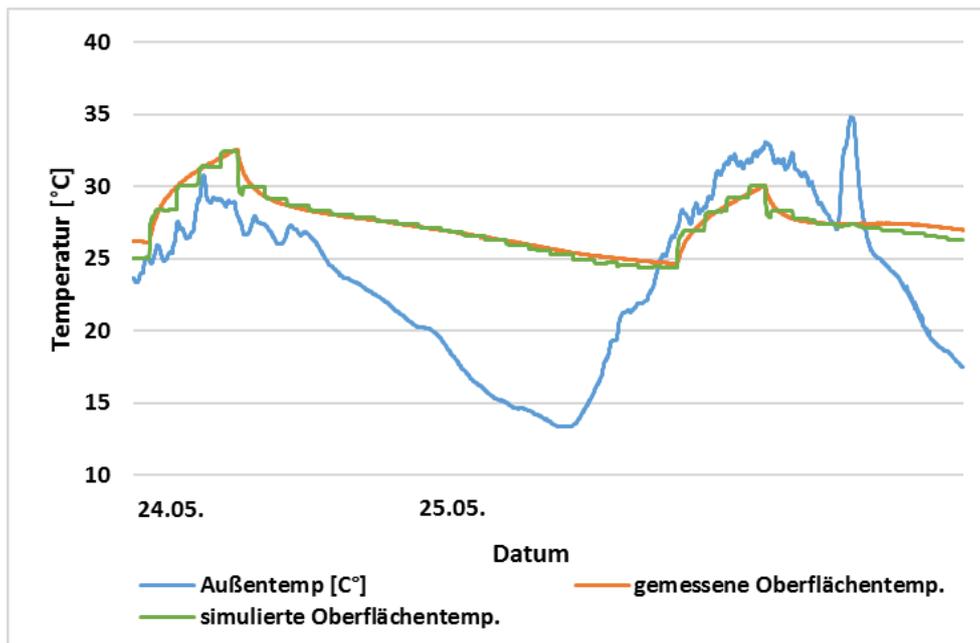


Abbildung 56: Vergleich Messung und Simulation

## 6 Testwände

### 6.1 Aufbau

Um die durchgeführten Simulationen messtechnisch zu verifizieren wurden drei Testwände auf der Forschungsterrasse der TU Kaiserslautern errichtet. Es wurde eine typische Altbauwand ohne Dämmung, eine Außenwand mit konventionellem Innendämmsystem und eine Außenwand mit dem neu entwickelten Innendämmsystem, d.h. einer Innendämmung mit einem PCM-Putz, erstellt. Um die Transmissionswärmeverluste so gering wie möglich zu halten, sind die weiteren Umfassungsflächen aus Styrodur mit einer Dicke von 24 cm errichtet worden.

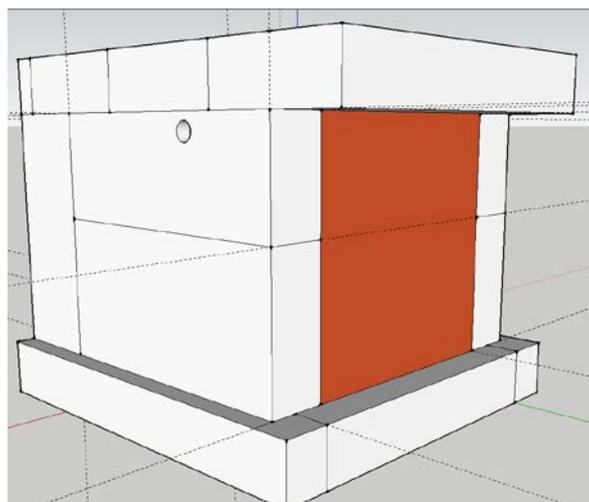


Abbildung 57: Aufbau einer Testwand

### 6.1.1 Auswahl der Materialien

#### Außenputz

Es wurde als Witterungsschutz gegen Schlagregen ein Kalkzementputz aufgetragen. Dieser reduziert die Durchfeuchtung des Mauerwerks bei Niederschlägen. Zudem wurde auf der Gesamtkonstruktion ein wasserdichter Deckel mit leichtem Überstand montiert, um den Niederschlag an einer Tropfkante gezielt mit ca. 10 cm Abstand an den Wänden vorbeizuführen.

#### Wände

Angelehnt an einen typischen Altbau der Jahrhundertwende, der über eine denkmalgeschützte Fassade verfügt, wurde ein U-Wert von  $1,7 \text{ W/m}^2\text{K}$  ausgewählt (Tobias Loga, 2015). Zur Vereinfachung (Lieferung, Kosten) wurde statt Vollziegelmauerwerk Kalksandstein verwendet. Vollziegel und Kalksandstein haben vergleichbare Werte bzgl. der spezifischen Wärmekapazität (Vollziegel  $0,84 \text{ kJ/kgK}$  – Kalksandstein  $0,88 \text{ kJ/kgK}$ ), Wärmeleitfähigkeit (Vollziegel  $0,96 \text{ W/m}^2\text{K}$  – Kalksandstein  $0,99 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) und Rohdichte (Vollziegel  $2.000 \text{ kg/m}^3$  – Kalksandstein  $1.800 \text{ kg/m}^3$ ).

Die restlichen Wände des Kubus bestehen aus 24 cm Stryrodur,  $\lambda = 0,034 \text{ W/mK}$ .

#### Innendämmung

Es wurde eine Innendämmung mit Mineralwolle von 8 cm mit einer Wärmeleitfähigkeit von  $0,035 \text{ W/mK}$  ausgewählt. Dies entspricht einer üblichen Innendämmung.

#### Putz

Es wird ein handelsüblicher Gipsputz (ohne Bindemittel) eingesetzt, dieser wird für die dritte Testwand mit 30% PCM vermischt. Untersuchungen ergaben, dass ein PCM-Anteil bis zu 30% verarbeitet werden kann. Mit einem höheren Anteil PCM ist die Verbindung zum Putz teilweise nicht mehr gegeben, das Produkt verbindet sich schlecht mit dem Untergrund („zu pulvrig“).

Anhand verschiedener Vorversuche an der TU Kaiserslautern wurde ein geeignetes Mischverhältnis entwickelt. Insbesondere die zugefügte Wassermenge wurde experimentell bestimmt, um Spannungsrisse zu vermeiden.

	Wand I	Wand II	Wand III
Außenputz	d= 2 cm $\lambda= 0,82 \text{ W/m}\cdot\text{K}$	d= 2 cm $\lambda= 0,82 \text{ W/m}\cdot\text{K}$	d= 2 cm $\lambda= 0,82 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
Mauerwerk	Kalksandstein d= 36,5 cm $\lambda= 0,99 \text{ W/m}\cdot\text{K}$	Kalksandstein d= 36,5 cm $\lambda= 0,99 \text{ W/m}\cdot\text{K}$	Kalksandstein d= 36,5 cm $\lambda= 0,99 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
Innen- dämmung	-	Mineralwolle d= 8 cm $\lambda= 0,035 \text{ W/m}\cdot\text{K}$	Mineralwolle d= 8 cm $\lambda= 0,035 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
Innenputz	Gipsputz d= 2 cm $\lambda= 0,47 \text{ W/m}\cdot\text{K}$	Gipsputz d= 2 cm $\lambda= 0,47 \text{ W/m}\cdot\text{K}$	Gipsputz mit 30% PCM d= 2 cm $\lambda= 0,31 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

Abbildung 58: Überblick Aufbau Testwände

Abbildung 55 zeigt den Aufbau der drei Testwände in tabellarischer Form. Die angegebenen Wärmeleitfähigkeiten entsprechen den Herstellerangaben.

### 6.1.2 Lüftung

Die Lüftung zu den Testwänden ist regelbar, sie kann sowohl temperatur- wie auch zeitgesteuert werden. Es sind Luftwechsel von  $0,17 \text{ m}^3/\text{h}$  bis zu  $17 \text{ m}^3/\text{h}$  möglich. Damit sind verschiedene Szenarien wie Stoßlüften, Nachluftwechsel etc. einstellbar. Die Luft wird an der Rückwand in den umbauten Raum aktiv hineingeblasen und kann durch eine Lüftungsöffnung an der Seite wieder entweichen. Beide Lüftungsöffnungen lassen sich mit gedämmten Klappen verschließen, wenn der Lüfter nicht aktiv ist.

Die Luftwechselrate der Lüfter wurde im eingebauten Zustand gemessen.

### 6.1.3 Heizung

Die Testwände bzw. der umbaute Raum lassen sich mittels elektrischer Wärmequellen beheizen. Der Innenraum umfasst  $1 \text{ m}^3$ . Die Wärmequellen sind von 0 bis 100 W regelbar. In Anlehnung an DIN 4108-6 (angepasst an den Messraum) wird eine solare Einstrahlung durch weitere Wärmequellen simuliert, dazu können eine Grundlast sowie interne Lasten hinzugefügt werden.

Die Heizlast wird in Abhängigkeit der Außentemperatur gesteuert. Eine Kompensation der Transmissionswärmeverluste bis zur Außentemperatur von  $-10^\circ\text{C}$  ist möglich.

### 6.1.4 Messtechnik

Die Testwände und der umbaute Raum sind insgesamt mit 42 Sensoren (Pt 100, Klasse A) ausgestattet, die an verschiedenen Positionen im Wandaufbau die Temperaturen messen: zwischen Mauerwerk und Innendämmung bzw. Innenputz, Innendämmung und Innenputz, in verschiedenen Tiefen der Putzschicht (zur Untersuchung des Wärmeeindringverhaltens) und an der Putzoberfläche. Zudem wurden sechs Lufttemperaturfühler in den Kuben eingesetzt, die Außenklimadaten werden von der neben den Messwänden angeordneten Klimamessstation aufgenommen. Abbildung 55 zeigt die Anordnung der Temperaturmessfühler in den Testwänden.

Die Sensoren im Putz wurden im Vorfeld in verschiedenen Putztiefen eingegossen, um die gewünschten Abstände (0,5 cm) zu gewährleisten. Der Block (Putz mit Sensoren) wurde als Ganzes auf der Dämmung bzw. bei Wand 1 auf dem Mauerwerk aufgebracht.

Übersicht der Messstellen:

<b>Messstelle</b>		<b>Kubus 1</b> (nur Innenputz)	<b>Kubus 2</b> (Innen-dämmung und Innenputz)	<b>Kubus 3</b> (Innen-dämmung und Innenputz mit PCM)	<b>Fühler</b>
MW/ ID bzw. IP	mittig	1.01.	2.01.	3.01.	Bauteiltemperatur (Fühler in Putz/ Dämmung)
MW/ ID bzw. IP	Seitlich unten	1.02.	2.02.	3.02.	Bauteiltemperatur (Fühler in Putz/ Dämmung)
MW/ID bzw. IP	Seitlich oben	1.03.	2.03.	3.03.	Bauteiltemperatur (Fühler in Putz/ Dämmung)
ID/IP	mittig	1.04.	2.04.	3.04.	Bauteiltemperatur (Fühler in Putz/ Dämmung)
ID/IP	Seitlich unten	1.05.	2.05.	3.05.	Bauteiltemperatur (Fühler in Putz/ Dämmung)
ID/IP	Seitlich oben	1.06.	2.06.	3.06.	Bauteiltemperatur (Fühler in Putz/ Dämmung)
IP zu Innenraum	Mittig, 0,5 cm Putztiefe	1.07.	2.07.	3.07.	Bauteiltemperatur (Fühler in Putz)
IP zu Innenraum	Mittig, 1,0 cm Putztiefe	1.08.	2.08.	3.08.	Bauteiltemperatur (Fühler in Putz)
IP zu Innenraum	Mittig, 1,5 cm Putztiefe	1.09.	2.09.	3.09.	Bauteiltemperatur (Fühler in Putz)
IP zu Innenraum	Mittig, auf Putz	1.10.	2.10.	3.10.	Oberflächentemperatur
IP zu Innenraum	Rechts unten, auf Putz	1.11.	2.11.	3.11.	Oberflächentemperatur
IP zu Innenraum	Rechts oben, auf Putz	1.12.	2.12.	3.12.	Oberflächentemperatur
IP zu Innenraum	Links oben, auf Putz	1.13.	2.13.	3.13.	Oberflächentemperatur
IP zu Innenraum	Links unten, auf Putz	1.14.	2.14.	3.14.	Oberflächentemperatur
Innenraum	Mittig im Raum	1.15.	2.15.	3.15.	Lufttemperatur innen
Innenraum	Mittig im Raum, alternative Höhe	1.16.	2.16.	2.16.	Lufttemperatur innen

Außenluft	Außen an Messkubus	1.17.			Lufttemperatur außen
-----------	--------------------	-------	--	--	----------------------

Legende: MW = Mauerwerk, ID = Innendämmung, IP = Innenputz



Abbildung 59: a) Ansicht Wand, Lage Messpunkte in den Bauteilschichten; b) Lage Innentemperaturfühler (blau: Mauerwerk)

### 6.1.5 Errichtung

Es wurden mit den oben genannten Aufbauten drei Testwände auf der Forschungsterrasse der TU Kaiserslautern errichtet. Das Kalksandsteinmauerwerk wurde auf einer Bodenplatte aus 24 cm Styrodur errichtet, um die Wärmeverluste nach unten zu minimieren. Das Mauerwerk wurde im klassischen Mauerwerksverband errichtet, um dem Fugenbild einer typischen Altbauwand nahe zu kommen und möglichst realistische Messwerte zu erhalten. Die Wände wurden nebeneinander zur besseren Vergleichbarkeit mit ca. 1 m Abstand errichtet und nach Süden ausgerichtet.



Abbildung 60: Aufbau der Testwände (Kalksandsteinmauerwerk)

Die fertigen Mauern ( $1 \text{ m}^2$ ) wurden auf der Außenseite mit einem Außenputz als Witterungsschutz versehen, auf zwei der drei Mauern wurde auf der Innenseite eine Dämmung aus Mineralwolle angebracht. Für einen gleichmäßigen Auftrag des Putzes wurden Putzschienen aus Kunststoff verwendet. Die Mineralwolle wurde mit geeignetem Dämmmörtel / Klebmörtel auf das Mauerwerk aufgebracht.

Das Mauerwerk wird nach unten, oben und seitlich mit Styrodurplatten umgeben, sodass ein Innenraum von  $1 \text{ m}^3$  entsteht, in dem das Innenraumklima thermisch konditioniert werden kann. Es wurde auch hier 24 cm Styrodur verwendet, um die Wärmeverluste zu minimieren.

Man erkennt in Abbildung 59 in der Seitenwand den oberen Luftauslass (Lüftungsschlitz). Dieser hat dieselbe Größe wie der Lufteinlass, um ein gleichmäßiges Durchströmen sicherzustellen. Der untere Lüftungsschlitz ist an der hinteren Wand seitlich verschoben, damit die Luft an der kompletten Wand vorbeiströmen kann.

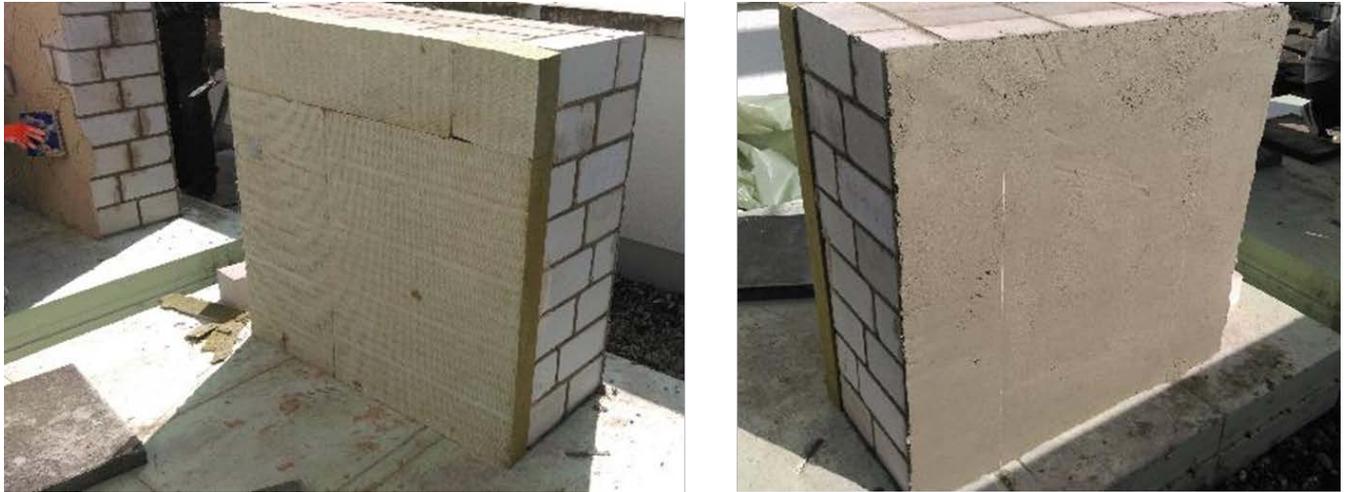


Abbildung 61 a) Anbringen Mineralwolle; b) Außenputz (alle Wände)



Abbildung 62: Testwände mit Styrodur-Seitenwänden

Es wurde in dem Projekt angestrebt, den Temperaturverlauf innerhalb des PCM-Putzes näher zu untersuchen. Um die Temperaturfühler in der gewünschten Position (Abstand 0,5 m übereinander) zu montieren, wurde im Labor ein Gipsblock gegossen. Hierzu wurde zunächst eine Schicht Gipsputz bzw. PCM-Gipsputz in die Form gegossen und der erste Fühler positioniert. Im nächsten Arbeitsschritt (nach kurzem Anziehen des Putzes, sodass keine Trennschicht entstand, aber auch der Temperaturfühler nicht mehr im Putz versinkt) wurde der nächste Fühler positioniert. Dies wurde noch einmal wiederholt. Der komplette Putzblock wurde auf der Dämmung bzw. auf dem Mauerwerk mit Innenputz verklebt.

Weitere Sensoren wurden auf dem Mauerwerk, der Dämmung und auf dem Innenputz angebracht.

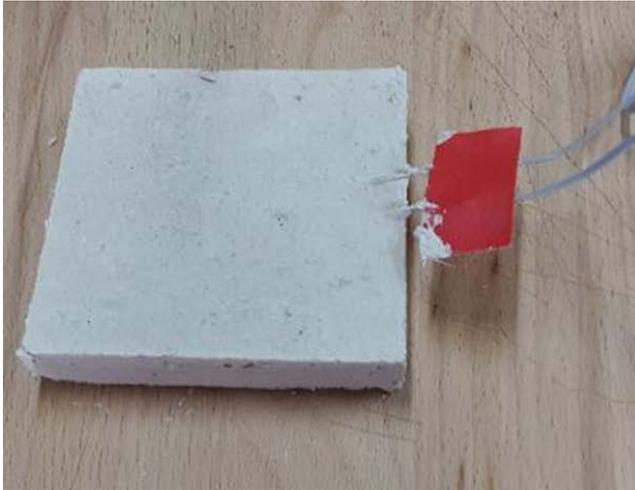


Abbildung 63: Einbau der Sensoren in verschiedenen Putzschichten vorab im Block

Zudem wurden Lufttemperaturfühler im Innenraum in zwei verschiedenen Höhen sowie ein Außentemperaturfühler montiert. Die benachbarte Wetterstation (man erkennt die benachbarte Testwand in Abb. 60) liefert zusätzliche Wetterdaten.



Abbildung 64: Blick auf die Sensoren sowie die benachbarte Wetterstation



Abbildung 65: Fertiggestellte Testwände mit Umhausung

## 6.2 Kalibrierung

Die einfachste Möglichkeit zur Kalibrierung eines Temperatursensors ist Prüfung des Messwerts gegen zwei bekannte physikalische Konstanten: den Schmelzpunkt von Eis und den Siedepunkt von destilliertem Wasser (unter Berücksichtigung des atmosphärischen Drucks). Aus diesen beiden Messungen lässt sich dann ein eventuell erforderlicher Korrekturwert bestimmen.

Dies wurde hier durchgeführt: Vor Einbau der Sensoren wurden die Widerstände der Sensoren mittels Eiswasser und kochendem Wasser gemessen, jeweils bis die Sensoren wieder die Raumtemperatur angenommen haben. Zusätzlich flossen noch die unterschiedlichen Temperaturen der Sensoren bei Raumtemperatur in die Bestimmung der Korrekturwerte (Offsets) ein. Ein Sensor wurde als Referenz ausgewählt und für die anderen entsprechenden Offsets errechnet wurden. Die Offsets wurden in der Messwerterfassungsanlage hinterlegt.

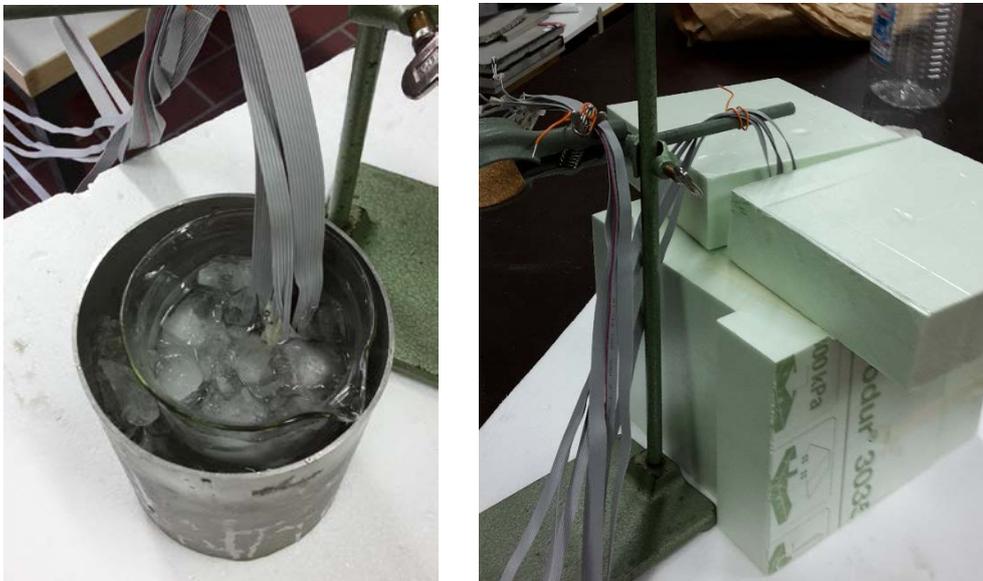


Abbildung 66: Kalibrierung der Sensoren in Eiswasser. Zur längeren Messung mit Dämmung umhüllt.

## 6.3 Voruntersuchungen

### 6.3.1 Transmissionswärmeverlust/ Wärmestrom

Es wurde der Transmissionswärmeverlust der drei Testwände rechnerisch gemäß EnEV 2014 bzw. DIN V 18599 berechnet und mit den gemessenen Werten verglichen. Dies diente als erste Annahme zur Dimensionierung der Wärmequellen.

#### Berechnung

Sind zwei Systeme mit verschiedenen Temperaturen  $T_1 > T_2$  durch eine gemeinsame Fläche  $A$  thermisch gekoppelt, fließt ein Wärmestrom  $\dot{Q}_{1 \rightarrow 2}$  der nach Isaac Newton durch

$$\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = k A (T_1 - T_2)_{\text{mit } T_1 > T_2}$$

gegeben ist. Die Stärke der thermischen Kopplung an der Systemgrenze ist durch den Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$  (U-Wert) beschrieben. Die betrachtete Wandfläche umfasst  $1 \text{ m}^2$ . Für einen Vergleich mit den gemessenen Werten wird eine Außentemperatur von  $10^\circ\text{C}$  und eine Innenraumtemperatur von  $20^\circ\text{C}$  angesetzt (Wikipedia, Wikipedia - Transmissionswärmeverlust, 2017).

	Mauerwerk	Innendämmung	Innendämmung mit PCM-Putz
<b>U-Wert <math>[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]</math></b>	1,658	0,346	0,343
<b>Wärmestrom <math>\dot{Q}</math> [W]</b>	16,58	3,46	3,43

## Messung

Die Innenraumtemperatur an den drei Testwänden wurde auf  $20^\circ\text{C}$  eingestellt, d.h. die Wärmequellen heizten die Innenluft auf, so dass diese bei konstant  $20^\circ\text{C}$  war. Die Testwände wurden mit einer Vorlaufzeit von 2 Tagen auf die gewünschte Temperatur gebracht.

Es werden 48 Stunden nach der Temperaturanpassung betrachtet, d.h. die notwendige Leistung der Wärmequellen, um die gewünschte Temperatur von  $20^\circ\text{C}$  zu halten. Die durchschnittliche Temperatur dieses Zeitraums betrug  $10^\circ\text{C}$ , mit einem Tageshöchstwert von  $16^\circ\text{C}$  und einem nächtlichen Minimum von  $6^\circ\text{C}$ .

Ergebnis:

	Mauerwerk	Innendämmung	Innendämmung mit PCM-Putz
<b>Gemessene Minuten mit 100 W</b>	602	346	315
<b>Gemessene Leistung [W]</b>	20,89	12,02	10,94

Es zeigt sich, dass in diesem Zeitraum 57% bzw. 52% der Wärmeleistung gespart werden können, wenn die Außenwand mit einer Innendämmung versehen wird.

Mit folgender Formel

$$\dot{Q}_T = H_T \cdot \Delta T \quad [\text{W}]$$

wird der Wärmestrom in Watt in Abhängigkeit des Transmissionswärmeverlusts der gesamten Hüllfläche  $A$  gemessen. Das entspricht der Wärmeabgabe des Gebäudes durch Transmission bei einer gegebenen Temperaturdifferenz innen-außen. Dies ist eine Leistungsangabe und zum Erhalt der Innentemperatur muss dieser Wert durch die gleiche Heizleistung ausgeglichen werden (tatsächlich erforderliche Heizleistung um Lüftungswärmeverlust und eventuell erforderliche Aufheizleistung höher und um solare und interne Energiegewinne je Zeiteinheit niedriger) (Wikipedia, Wikipedia - Transmissionswärmeverlust, 2017).

Aufgrund der baulichen Gegebenheiten (Wärmebrücken, Luftundichtigkeiten) ist das Messergebnis realistisch. Der aufliegende Deckel schließt nicht komplett rundherum luftdicht mit den Wänden ab, zudem sind die Lüftungsöffnungen zwar mit gedämmten Deckeln verschlossen, wenn die Lüftung nicht in Betrieb ist, aber auch diese schließen nicht luftdicht ab.

### 6.3.2 Temperaturanstieg

Die drei Testwände wurden 18 Stunden mit jeweils 100 W beheizt, es wurde 0,18 kWh durch die Wärmequellen eingebracht. Die Temperatur an der Oberfläche der Testwand mit PCM-Putz und Innendämmung steigt erwartungsgemäß langsamer an, als bei der Testwand mit Innendämmung. Die Testwand mit Mauerwerk kann das Speichervermögen des Mauerwerks nutzen und hat daher die geringste Oberflächentemperatur.

Die Oberflächentemperatur betrug am Ende des Aufheizprozesses bei der Testwand Mauerwerk 177%, bei der Testwand Innendämmung 259% und bei der Testwand Innendämmung mit PCM-Putz 270% im Vergleich zur Temperatur vor dem Aufheizvorgang. So wurden im Vergleich zur Testwand Innendämmung bei der Testwand Mauerwerk um 30,46 K und von der Testwand Innendämmung mit PCM-Putz um 9,33 K erhöhte Temperaturen erhalten.

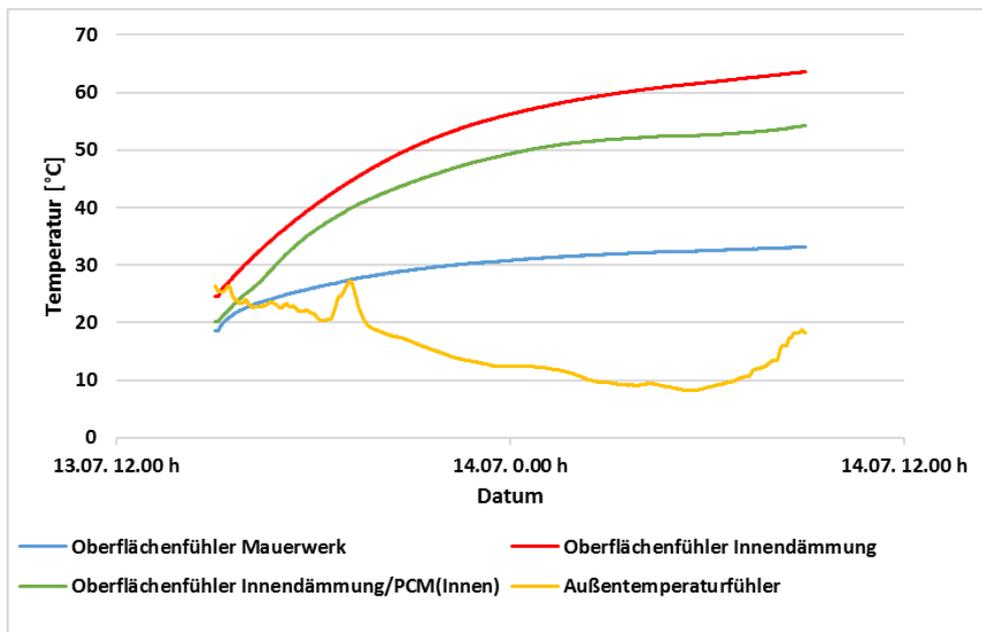


Abbildung 67: Aufheizprozess bei den drei Testwänden

### 6.3.3 Luftwechselrate

Zur Bestimmung des tatsächlichen Luftwechsels wurden die Lüfter in eingebautem Zustand erneut vermessen. Hierzu wurden verschiedene Stromstärken eingestellt, zu beachten ist, dass der Lüfter mindestens 40% der Maximal-Leistung (Pulsweitenmodulation PWM) benötigt, um zu starten (loszudrehen).

Die Lüfter wurden im Vorfeld im Labor vermessen, allerdings variiert der Luftkanal (und damit die Luftströmungen) im eingebauten Zustand zu der optimalen Laborbedingung (glatte Wände, gleichmäßiger Querschnitt, keine Windbewegungen).

Im eingebauten Zustand wurden alle drei Lüfter an verschiedenen Positionen gemessen (oben, oben rechts, rechts, unten rechts etc.). Die Messergebnisse der verschiedenen Positionen und der drei Testwände wurden gemittelt.

Der Lüfterdurchmesser beträgt 4 cm, d.h. 12,56 cm<sup>2</sup>. Die Messung erfolgte mit einem Flügelradanemometer in m/s und wurde in m<sup>3</sup>/h im Nachgang umgerechnet.

Um im späteren Messablauf kleinere Luftwechselraten, d.h. unter  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  zu erreichen, wird die Betriebszeit variiert. Die Lüfter laufen nur minutenweise.

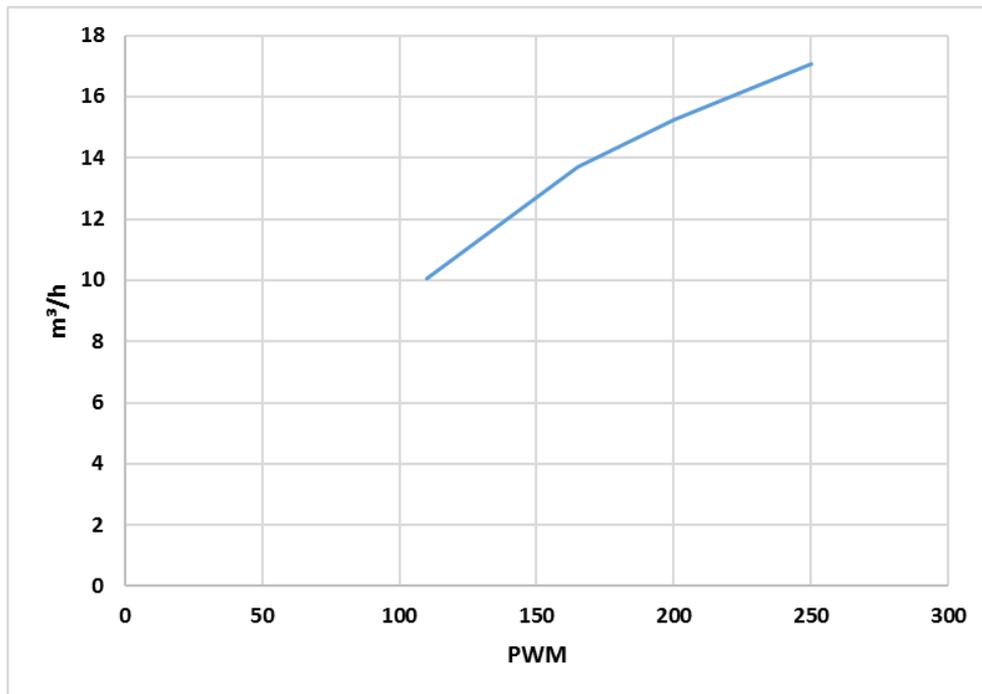


Abbildung 68: Messung Lüfter im eingebauten Zustand



Abbildung 69: Messung Lüfter

#### 6.3.4 Wärmebrückenuntersuchung

Die erhöhte Wärmeleitung von Wärmebrücken verursacht an diesen Stellen eine geringe Innenoberflächentemperatur und es entsteht das Risiko von Tauwasserausfall, Schädigung der Bausubstanz und Schimmelbildung. Zudem führt es zu einem erhöhten Heizwärmebedarf. Im Bereich von Wärme-

brücken sinkt bei niedrigen Außentemperaturen die raumseitige Oberflächentemperatur von Bauteilen stärker ab als in den ungestörten Bereichen. Bei Unterschreiten der Taupunkttemperatur fällt Tauwasser (Kondenswasser) an der Oberfläche aus.

Als Wärmebrücken bezeichnet man Bereiche in der thermischen Gebäudehülle, bei denen durch Materialwechsel in der Bauteilebene, Bauteilgeometrie oder konstruktive Zwänge während der Heizperiode gegenüber dem ungestörten Bauteil erhöhte bzw. zusätzliche Wärmeabflüsse auftreten, sodass auf der inneren Seite von Außenbauteilen die Oberflächentemperatur örtlich begrenzt stark absinkt. Fugen und Undichtigkeiten sind keine Wärmebrücken im engeren Sinn. Sie haben durch die lokale Auskühlung von Bauteilen aber praktisch den gleichen Effekt (Deutsche Energie-Agentur, 2015).

Materialbedingte Wärmebrücken entstehen durch die verwendeten Materialien. Da jedes Material unterschiedlich gut Wärme leitet, sind besonders Baustoffe mit hoher Wärmeleitfähigkeit für die Entstehung von Wärmebrücken verantwortlich. Dies sind insbesondere Metalle, die allgemein sehr gut Wärme leiten.

Geometrische Wärmebrücken ergeben sich, wenn die Innenoberfläche ungleich der Außenoberfläche ist. Allgemein gilt je kompakter ein Gebäude gebaut ist, also je kleiner das Verhältnis Außenoberfläche zu Innenoberfläche ist umso geringer sind die Energieverluste. Ursache ist der Kühlrippeneffekt, der beispielsweise bei Hausaußenecken, Dachgauben und Erkern auftritt (Wikipedia, Wärmebrücken, 2017).

Die Gruppe der konstruktiven Wärmebrücken unterscheidet sich kaum von den materialbedingten Wärmebrücken. Ihre Ursache liegt in erster Linie in planerischen Zwängen oder baulicher Notwendigkeit. Als Vertreter dieser Wärmebrückenkategorie könnte der Rollladen oder ein Regenfallrohr innerhalb eines Wärmedämmverbundsystems bezeichnet werden. Ebenso kann man einen Bauteilwechsel (Fensteranschluss) als konstruktive Wärmebrücke bezeichnen (Wärmebrückenportal, 2017).

Der Anschluss der Testwand an die Styrodurmauern, –boden und –decke wurde mit der Simulationssoftware TRISCO modelliert. Der Aufbau entspricht den tatsächlichen Testwänden. Hierbei wurden die Wärmeströme, die Wärmebrücken und insbesondere die Fugen näher betrachtet. Zur Überprüfung der Simulation wurden Thermografieaufnahmen der Testwände durchgeführt.

## **Wärmebrückensimulation mit Trisco**

### **Modellbildung**

Modelliert wurde die vordere Kante der Testwände, im Anschluss zwischen Mauerwerksaufbau und Styrodurplatten. Angrenzend daran wurde auch der Decken- und Bodenplattenanschluss mit in das Modell integriert. Somit können die zwei kritischsten Stellen bezüglich lokaler Wärmeverluste gemeinsam in einem Modell betrachtet werden.

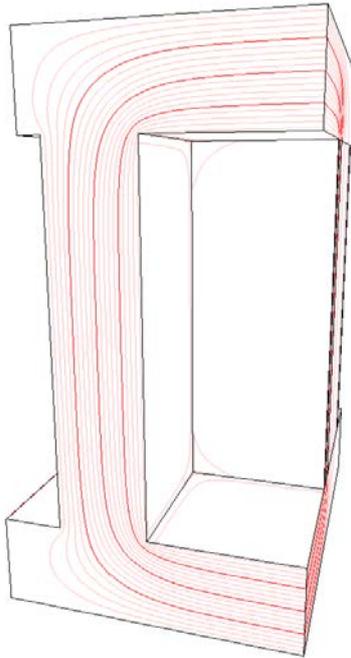


Abbildung 70: Trisco 3D-Modell Wärmebrücke

Die Silikonfugen an den Anschlüssen wurden mit einer Dicke von 5 mm und einer Wärmeleitfähigkeit von 0,5 W/mK angenommen. Diese Werte entsprechen nicht der Realität. Allerdings ist es so, dass die Silikonbahnen relativ ungleichmäßig und auch nicht an allen Stellen komplett dicht verarbeitet wurden. Deshalb wurden die Werte für die Berechnung der Energieverluste so angenommen. Auf den Bildern, die mit der Wärmebildkamera aufgenommen wurden, sieht man den erhöhten Verlust an den Verbindungsstellen sehr deutlich. Unterhalb des Mauerwerks wurde keine Silikonfuge angenommen, da dort aufgrund der Gewichtskraft der Wand die Fuge nur eine sehr geringe Dicke hat und auch nicht undicht ist.

Das Raster für die Berechnung, über das man die Genauigkeit der Berechnung steuern kann, wurde auf 1 mm gesetzt. An diesen Wert wurde sich durch iteratives Verringern des Rasters angenähert bis die Konvergenz der Werte ausreichend genug erreicht war. Die Berechnung dauerte mit diesem Wert zwischen 5 und 20 Sekunden (Dobrowolski, 2017).

### **Randbedingungen**

Die Randbedingungen der Berechnung wurden in Anlehnung an DIN EN ISO 6946 gewählt. So wurden die Wärmeübergangswiderstände außenliegend  $R_{se}$  zu 0,04 m<sup>2</sup>K/W, innenliegend  $R_{si}$  aufwärts zu 0,10 m<sup>2</sup>K/W, horizontal zu 0,13 m<sup>2</sup>K/W und abwärts 0,17 m<sup>2</sup>K/W. Angeben werden müssen diese Werte allerdings als Wärmeübergangskoeffizient. Dieser berechnet sich zu  $h=1/R_s$ . Den Schnittflächen der Testkuben wurde keine Randbedingung zugewiesen. TRISCO geht dann von adiabaten Bedingungen aus. Dies bedeutet, dass kein Wärmefluss senkrecht zur Ebene stattfindet.

Die Außentemperatur wurde zu 0 °C und die Innentemperatur zu 20 °C angenommen.

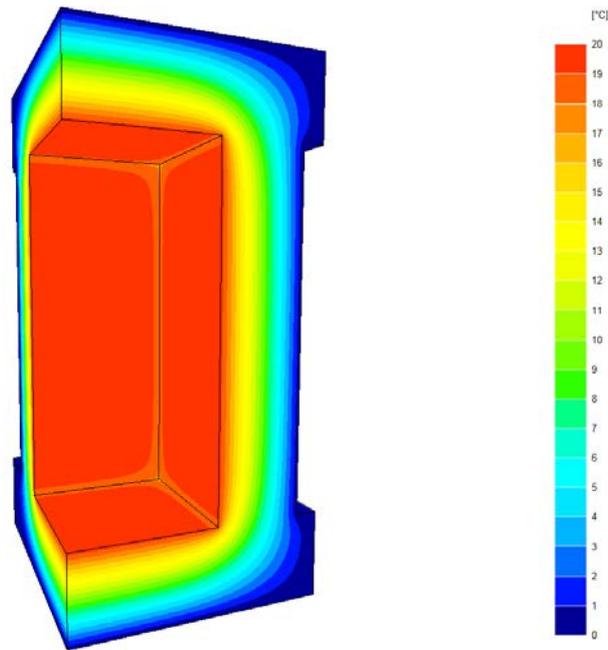


Abbildung 71: Trisco-Simulation Testwand Mauerwerk, ohne Fugen

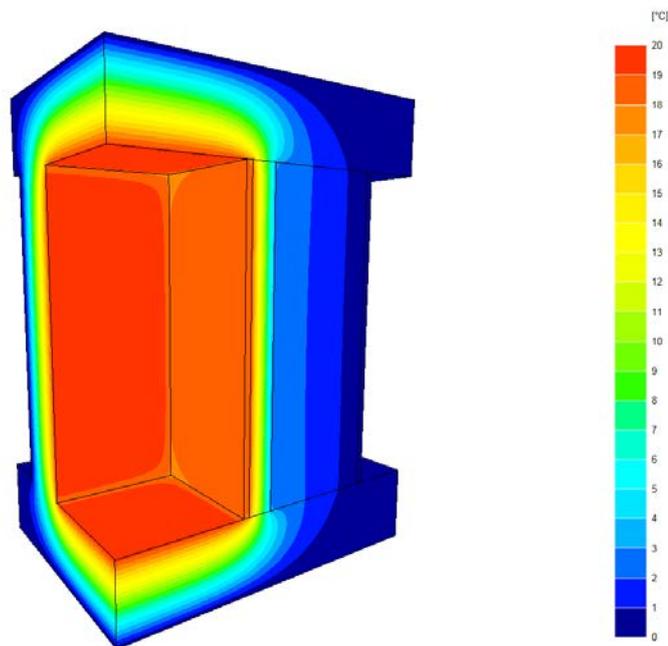


Abbildung 72: Trisco- Simulation Testwand Innendämmung, ohne Fugen

Erwartungsgemäß kann man erkennen, dass ohne Innendämmung die Wärme stärker in das Mauerwerk eintritt und das Mauerwerk bei einer Innendämmung auf der Rauminnenseite deutlich kälter ist.

Werden die vorhandenen Fugen an den Anschlussstellen ebenfalls mitsimuliert, entstehen an diesen Stellen Wärmeverluste. Um den Effekt deutlicher darzustellen, wurde eine Außentemperatur von  $-5^{\circ}\text{C}$  und eine Innentemperatur von  $20^{\circ}\text{C}$  gewählt. Die Innenseite der Testwand Mauerwerk ist mit  $15^{\circ}\text{C}$  deutlich kälter wie die Testwand mit Innendämmung ( $18^{\circ}\text{C}$ ). Die umgebenen Styrodurwände

haben die gleiche Temperatur. Die Innendämmung erhöht die Oberflächentemperatur an der Innenseite und reduziert die Temperatur des Mauerwerks (ohne Dämmung:  $-2,9\text{ °C}$ , mit Innendämmung  $-4,44\text{ °C}$ ). Die Temperatur an den Silikonfugen ist in beiden Varianten gleich.

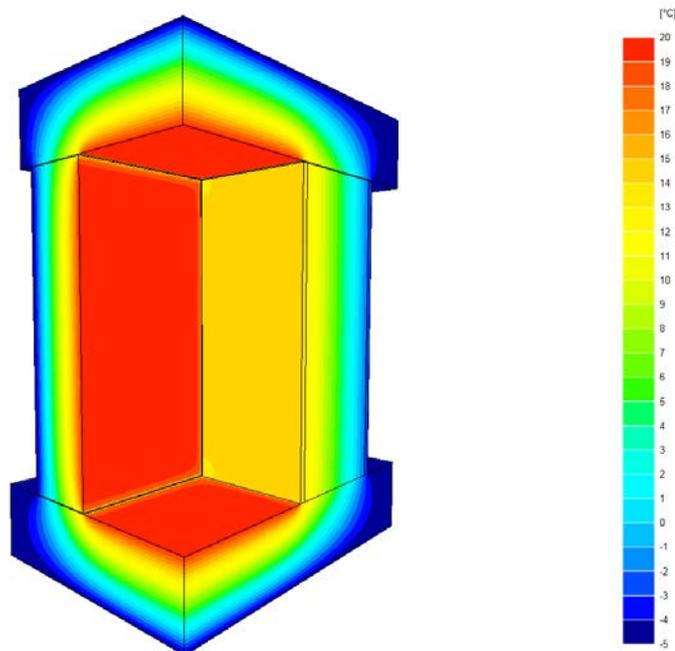


Abbildung 73: Trisco-Simulation Testwand Mauerwerk mit Fugen

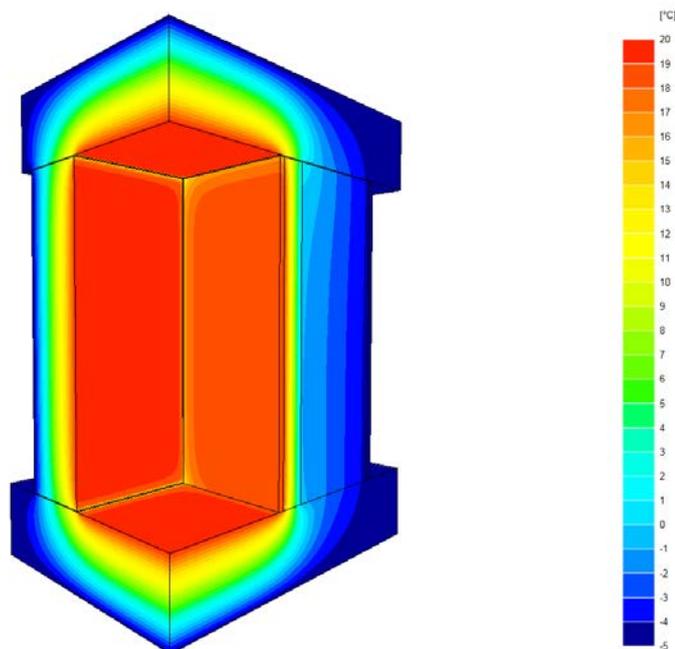


Abbildung 74: Trisco-Simulation Testwand Innendämmung mit Fugen

Nachfolgend kann man in der Tabelle den Wärmestrom der einzelnen Modelle mit und ohne Fugenausbildung ablesen, wie auch die minimale Oberflächentemperatur an der Innenseite der Wand. Als Außentemperatur wurde  $-5\text{ °C}$ , als Innentemperatur  $20\text{ °C}$  angenommen (Dobrowolski, 2017). Diese Werte passen recht gut zu den gemessenen Werten aus Abschnitt 6.3.1, während die Berechnung nur ein erster Näherungswert war.

Modell	Fugenausbildung	Wärmestrom	min. Innentemperatur
		[W]	[°C]
Ohne Dämmung	ohne Fugen	21,56	14,23
	mit Fugen	22,19	12,34
Innendämmung	ohne Fugen	7,16	16,79
	mit Fugen	8,58	12,21
Außendämmung	ohne Fugen	9,01	17,17
	mit Fugen	10,57	14,67

### Thermografie

Thermografieaufnahmen machen Wärmebrücken in der Gebäudehülle sichtbar. Mit den Aufnahmen kann man Temperaturabsenkungen auf der Innenseite oder erhöhte Oberflächentemperaturen auf der Außenseite von Bauteilflächen anschaulich darstellen. Für die Aufnahmen wurden die Innenräume mit 100 W 12 Stunden vorgeheizt, sodass eine Innentemperatur von ca. 55°C vorhanden war. Die Aufnahmen (Abbildung 72) zeigen neben dem im Vergleich zu den Styrodurwänden erhöhten Transmissionswärmeverlust durch die Testwand die geometrischen Wärmebrücken.

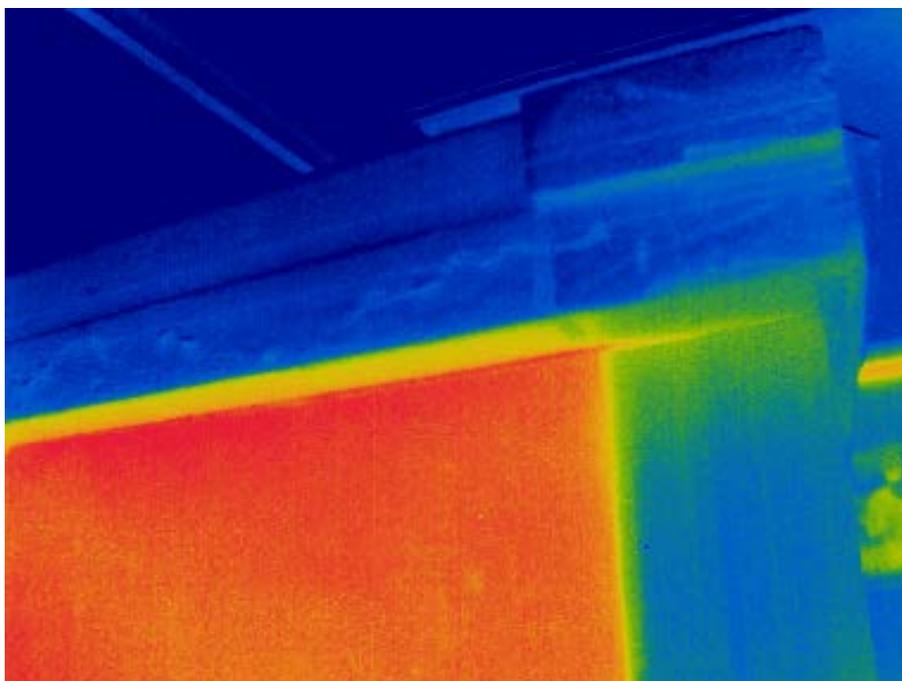


Abbildung 75: Thermografieaufnahme Anschluss Wand-Deckel

### 6.3.5 Detailuntersuchungen des thermischen Verhaltens

Neben den Untersuchungen der Wärmebrücken wurden weiteren Thermografie-Aufnahmen erstellt um das thermische Verhalten der Testwände im Detail zu untersuchen.



Abbildung 76: Thermografieaufnahme starke Undichtigkeiten Lüftungsklappe, Deckel

Abbildung 73 zeigt Undichtigkeiten an der geschlossenen Lüftungsklappe, sowie an Fugen (zum Beispiel zwischen Seitenwand und Decke). Diese Undichtigkeiten wurden im Nachgang behoben.

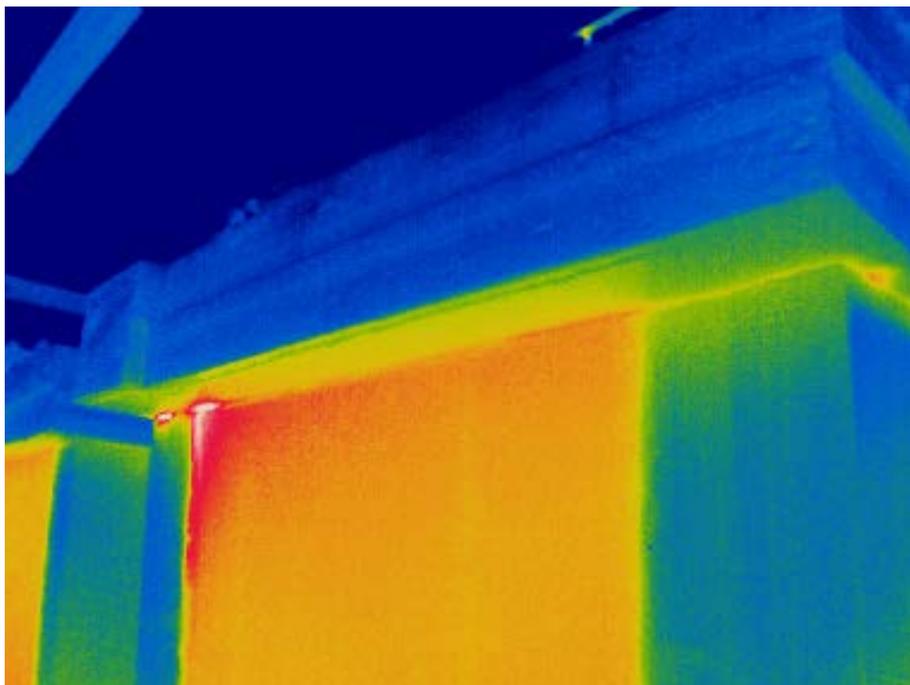


Abbildung 77: Thermografieaufnahme Wärmestau

Abbildung 74 zeigt wie die an der warmen Außenwand erwärmte Luft aufsteigt und sich unter dem Dachvorstand staut. Des Weiteren ist auch hier eine Undichtigkeit an der linken, oberen Ecke des Mauerwerks zu sehen, die ebenfalls im Nachgang abgedichtet wurde.

#### 6.4 Messablauf

Die drei Testwände (Mauerwerk, Innendämmung und Innendämmung mit PCM-Putz) verfügen über einen konditionierbaren Innenraum. Die Wärmequellen im Inneren können sowohl zeitlich gesteuert werden, wie auch eine voreinstellbare Temperatur halten. Bei den Lüftern lassen sich verschiedene Lüftungstärken und Zeitintervalle einstellen.

Es wurden folgende Varianten untersucht:

Variation der Wärmequellen

- solare Einstrahlung
- Aufheizen (100 W)
- Nutzerprofile (interne Lasten)
- Vorgegebene Innenraumtemperatur
- Keine zusätzlichen Wärmequellen, nur Transmission durch die Hülle/ Luftaustausch

Variation des Luftwechsels

- Nachtlüftung
- Stoßlüften nach Nutzerprofilen
- Keine Lüftung, nur Luftaustausch durch Undichtigkeiten.

Die internen Lasten wurden nach DIN 4108-6 (Wohngebäude) bzw. Din V 18599 zusammengefasst und auf die Raumgröße des Innenraums (1 m<sup>3</sup>) angepasst (Werte gerundet).

	<b>Wohngebäude Profil Familie mit Anwesen- heit tagsüber</b>	<b>Wohngebäude Profil Familie arbeitend/ Schule</b>	<b>Nichtwohngebäude – Gruppenbüro</b>
<i>Erläuterung</i>	<i>4 Personen: 1 Person berufstätig, 1 Schüler, Hausfrau mit Kleinkind</i>	<i>4 Personen: abwesend 9-17 Uhr</i>	<i>nach DIN V 18599</i>
6 – 7 Uhr	5 W	5 W	0 W
7 – 9 Uhr	5 W	5 W	12 W
9 – 11 Uhr	2 W	0 W	12 W
11 – 14 Uhr	5 W	0 W	12 W
14 – 17 Uhr	3 W	0 W	12 W
17 – 22 Uhr	4 W	6 W	0 W
22 – 6 Uhr	3 W	3 W	0 W

## 6.5 Ergebnisse

Die Messungen wurden Anfang Mai 2017 gestartet und laufen über das Projektende hinaus. Wie auch schon in den Simulationen lag der Schwerpunkt der Untersuchungen auf dem Einfluss des Systems auf die sommerliche Überhitzung. In der nachfolgenden Abbildung 75 sieht man einen Auszug der Oberflächentemperaturen der drei Testwände: ohne Dämmung, mit Innendämmung und mit Innendämmung und PCM-Putz. Der PCM-Putz kann die innenseitigen Oberflächentemperaturen im Tagesverlauf abmildern: Temperaturspitzen werden gepuffert, ebenso die Temperatursenken. Wichtig ist dabei, dass das PCM wieder in den erstarrten Zustand wechseln kann, das heißt dass die Temperatur unter 23 °C fällt, um die Wärme eines erneuten Temperaturanstiegs wieder aufnehmen zu können.

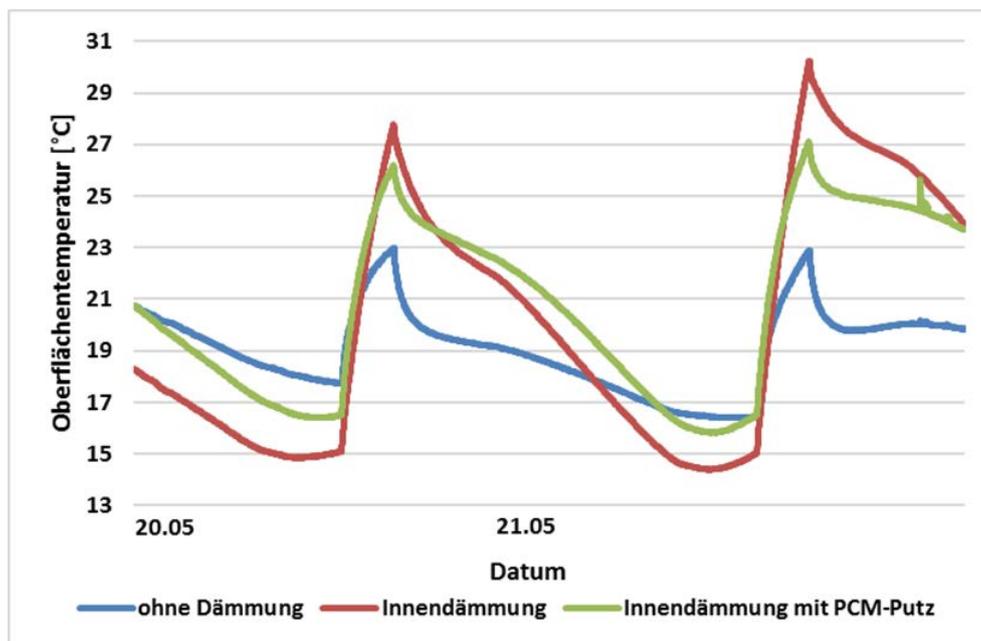


Abbildung 78: Vergleich der Oberflächentemperaturen in den drei Testwänden

### 6.5.1 Temperaturverteilung an den Testwänden

Auf dem Mauerwerk und auf der Innendämmung, sowie auf der Oberfläche der Testwände wurden fünf Temperatursensoren wie folgt eingebaut:

- oben links
- oben rechts
- mittig
- unten links
- unten rechts.

Die Wärmequellen wurden in dem Innenraum an der hinteren Abschlusswand mittig am Boden montiert (Einfallswinkel solare Einstrahlung). Untersucht werden soll, ob es zu einer Temperaturschichtung an den Testwänden kommt. Der Lufteinlass mit Lüfter befindet sich ebenfalls an der hinteren Abschlusswand unten links, der Luftauslass an der rechten Seitenwand oben neben der Testwand.

Nachfolgende Grafik 76 zeigt auf der rechten Seite (Luftauslass) eine leichte Temperaturdifferenz zu links, sowie oben höhere Temperaturen wie unten (Auszug aus Messung: 29.08. 16:30 – 30.08. 4:20Uhr). Die gesamte Temperaturdifferenz beträgt hier 0,76 K.

Für die weiteren Auswertungen wird jeweils die gemittelte Temperatur verwendet.

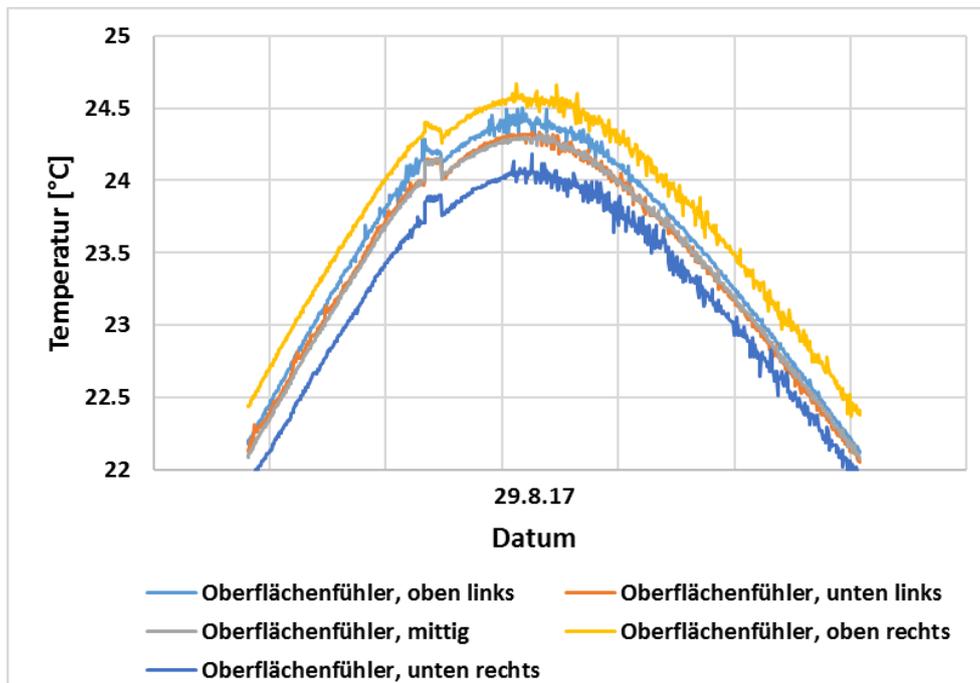


Abbildung 79: Temperaturschichtung Testwand Innendämmung

### 6.5.2 Messungen in den unterschiedlichen Schichten

In der nachfolgenden Abbildung 77 sieht man die Temperaturen im Tagesverlauf in den unterschiedlichen Bauteil-Schichten für die Testwand mit Innendämmung. Es wurde in der Nacht vom 01. auf den 02.06.2017 eine Nachtlüftung (21 bis 9 Uhr) durchgeführt, wie sie zum Beispiel in Bürogebäuden möglich ist. Die Außentemperatur sank in diesem Zeitraum auf 21,3°C, wodurch auch die Temperaturen im Innenraum und im Putz unter die Schmelztemperatur von 23°C sanken.

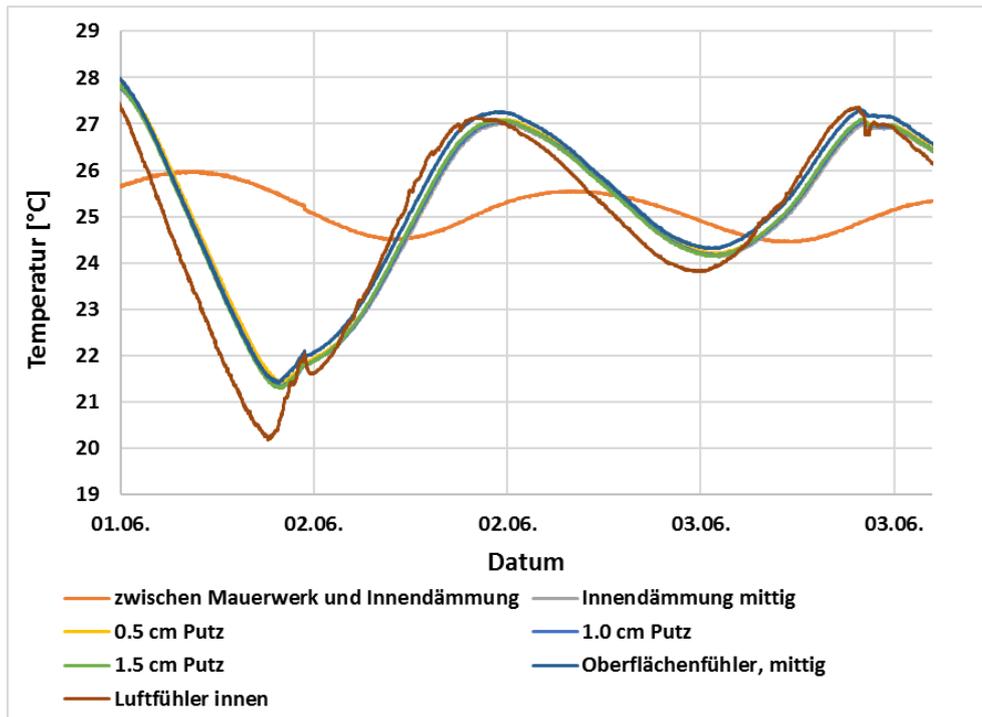


Abbildung 80: Temperaturen in den verschiedenen Messschichten, Testwand Innendämmung

Abbildung 78 vergleicht die Temperaturen der verschiedenen Bauteilschichten der Testwand mit konventioneller Innendämmung mit der Testwand mit dem neuen PCMhaltigen Innendämmsystem zu zwei verschiedenen Zeitpunkten. Bei einem näheren Blick auf die Temperaturen vom 02.06.2017 um 16:30 Uhr sieht man, dass die Temperaturen der Testwand mit Innendämmung und PCM-Putz (orange/ grün) leicht unter den Temperaturen der Testwand mit Innendämmung liegen.

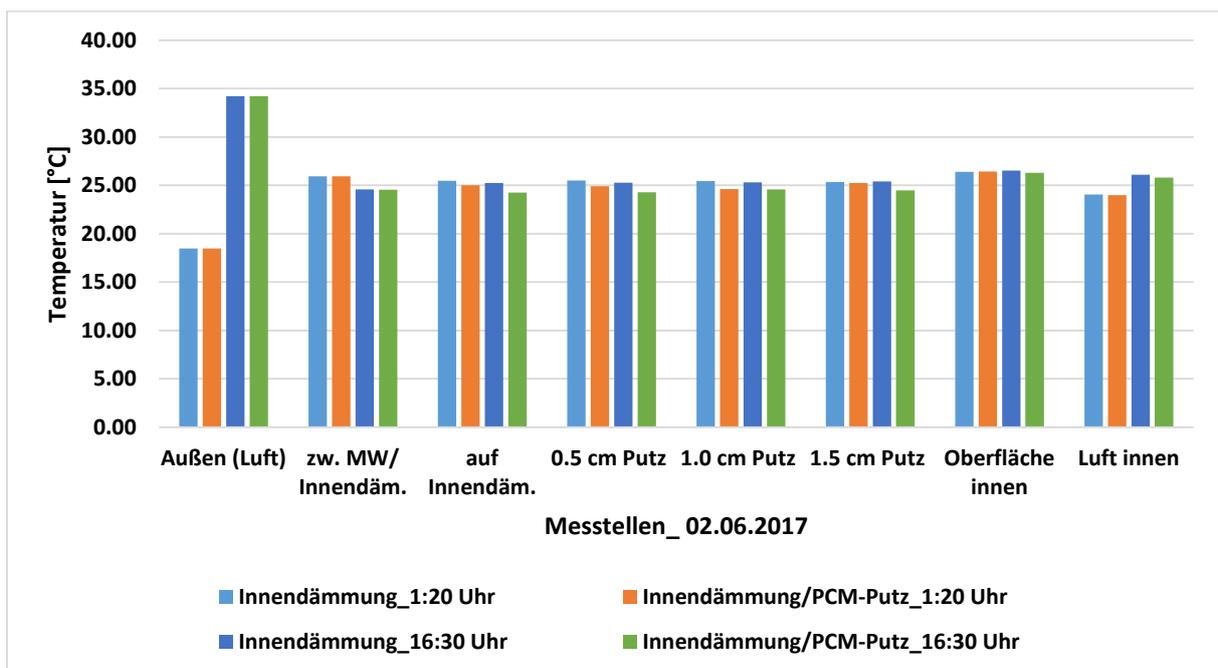


Abbildung 81: Vergleich der Schichten Innendämmung und Innendämmung mit PCM-Putz

Zur besseren Übersicht des Temperaturverlaufs in dem Bauteil „Innendämmung mit PCM-Putz“ dient nachfolgendes Diagramm (Abbildung 79). Die Temperatur steigt innerhalb der PCM-Putz Schicht in Richtung Innendämmung an. Mit höherer Schichtdicke ist eine Aktivierung des PCMs schwieriger, da die Wärme durch den Gipsputz transportiert werden muss. An der Stelle zwischen Mauerwerk und Innendämmung kommt die Speicherfähigkeit des Mauerwerks zum Tragen.

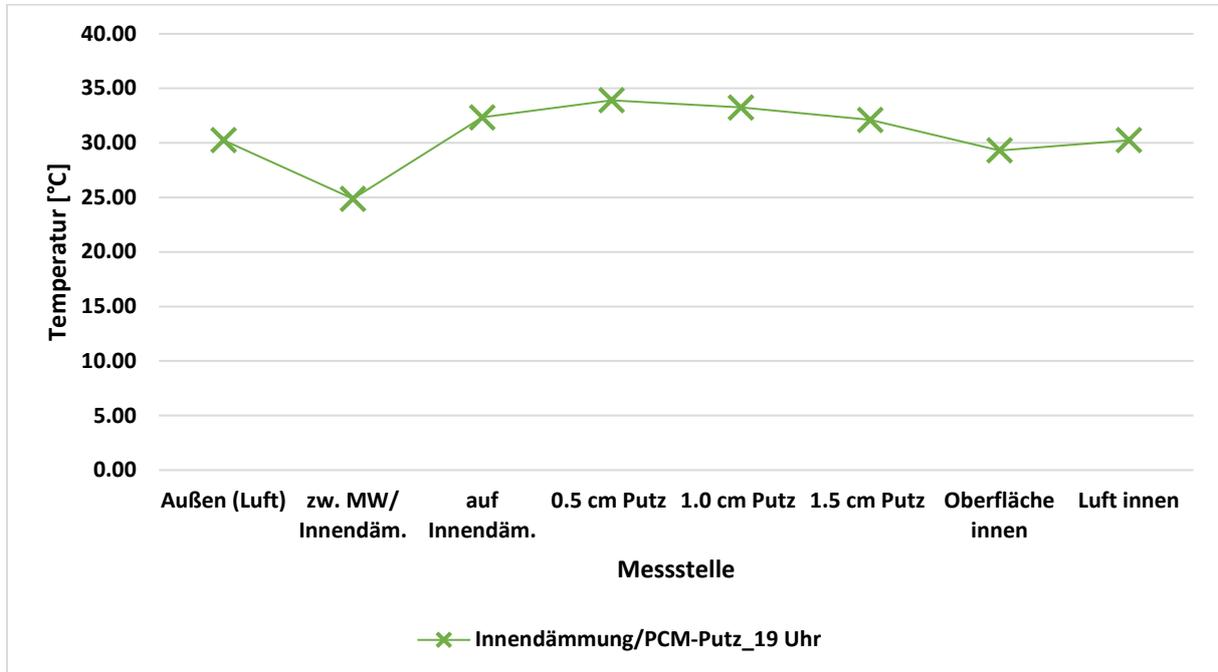


Abbildung 82: Temperaturverlauf in den Schichten PCM-Putz

### 6.5.3 Messungen mit unterschiedlichen Luftwechselraten

Für die in den nachfolgenden Diagrammen gezeigten Messungen wurden folgende Einstellungen vorgenommen:

Wärme:

- solare Einstrahlung
- interne Lasten Profil „Familie arbeitend/ Schüler“

Lüftung:

- Nacht-Luftwechsel  $n = 2,5/h$  und  $5,5/h$

Die beiden betrachteten Tage haben ähnliche Außentemperaturen: die Tagesspitze liegt bei ca.  $30^{\circ}\text{C}$ , der Nachttiefpunkt bei ca.  $10,5^{\circ}\text{C}$ . Die Messungen bestätigen die vorhergehenden Simulationen: mit Aktivierung der Lüftung (im Diagramm grau hinterlegt) sinkt die Oberflächentemperatur, insbesondere an den beiden Testwänden Innendämmung und Innendämmung mit PCM-Putz (keine thermische Speichermasse durch das Mauerwerk). Durch den mit  $5,5/h$  erhöhten Luftwechsel werden die leicht höheren Oberflächentemperaturen (durch höhere Außentemperatur) leicht unter die Oberflächentemperaturen mit  $n = 2,5/h$  gesenkt. Dazu wurde für den erhöhten Luftwechsel mit  $n = 5,5/h$  ein Wert angesetzt, der mit Querlüftung in Wohngebäude oder durch Lüftungsanlagen in Bürogebäude noch realisierbar ist.

	Luftwechsel n = 2,5/h		Luftwechsel n = 5,5/h	
	Max. Temperatur	Min. Temperatur	Max. Temperatur	Min. Temperatur
Mauerwerk	24,47	21,99	24,58	22,19
Innendämmung	29,21	21,12	29,91	20,68
Innendämmung mit PCM-Putz	29,02	19,83	29,29	19,42

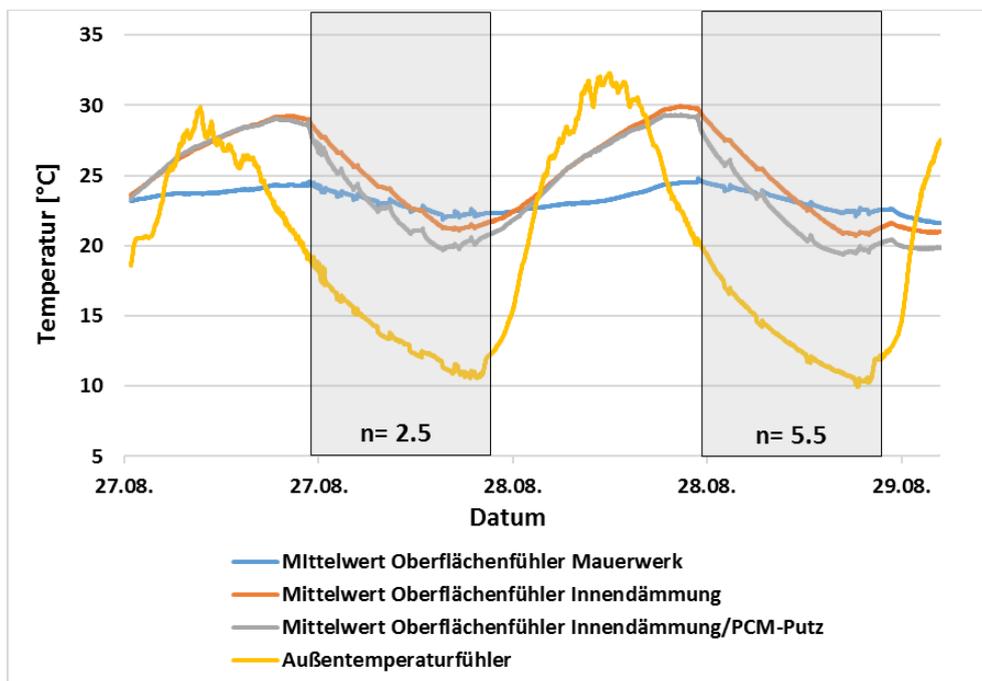


Abbildung 83: Variation der Luftwechselrate

Wird statt einem nächtlichen Luftwechsel über mehrere Stunden nur kurzzeitig (je 20 min) gelüftet, wird die Oberflächentemperatur kurz gesenkt (vgl. Abbildung 81). Ob dies für einen Phasenwechsel ausreicht, ist von den vorhandenen Temperaturen abhängig. In unten dargestellten Fall wird dadurch die Schmelztemperatur vorzeitig unterschritten.

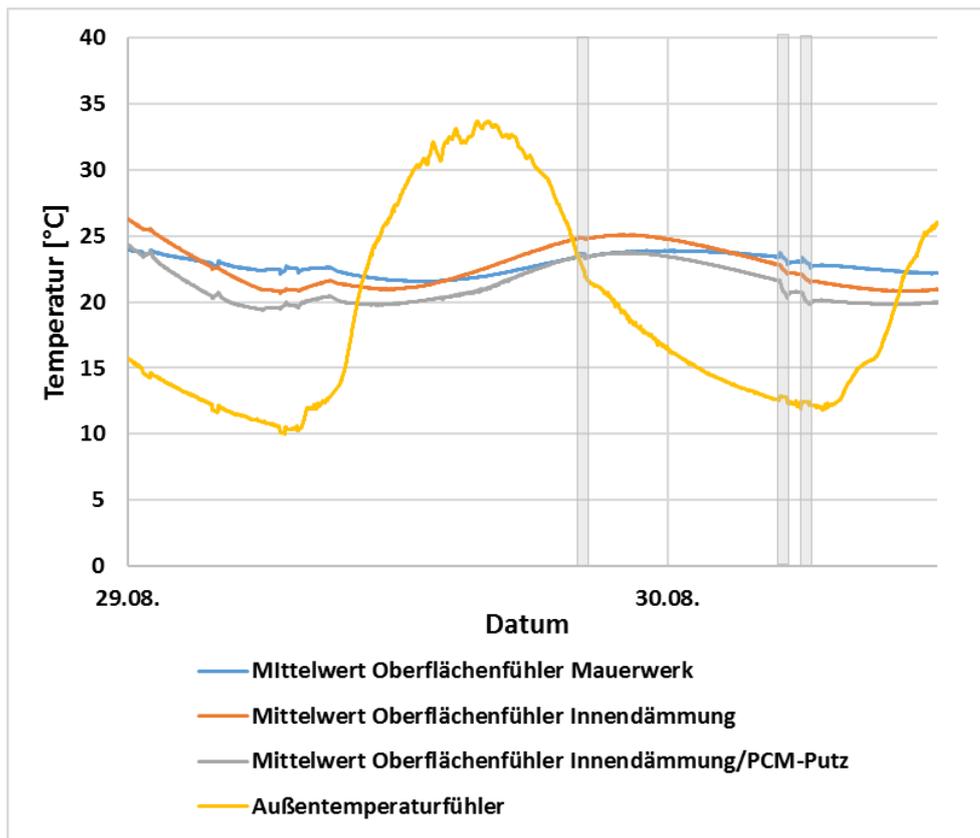


Abbildung 84: Stoßlüften

#### 6.5.4 Messungen mit unterschiedlichen Internen Lasten

Es wurde untersucht, wie sich die Anwesenheit von Personen auf die Innenraumtemperaturen auswirkt. Hierzu wurden die beiden Profile „Wohngebäude Profil Familie mit Anwesenheit tagsüber“ und „Wohngebäude Profil Familie arbeitend/ Schule“ verglichen. Beiden Profilen liegen vier Personen zugrunde.

Deutlich sind in Abbildung 81 die Temperatureinbrüche zu den Lüftungszeiten zu erkennen. Durch die geringen Außentemperaturen wurde der Schmelzbereich des PCMs nicht erreicht. Die Anwesenheit der Personen führt trotz höherer Lüftungsraten zu höheren Oberflächentemperaturen (plus 1,5 °C) bei allen drei Testwänden tagsüber. Die Oberflächentemperatur der Testwand Mauerwerk ist erwartungsgemäß geringer als bei den beiden Testwänden mit Innendämmung.

Durch die leicht kühleren Nachttemperaturen bei Profil 2 (minus 1 Grad im Vergleich zur vorherigen Nacht) sinken die Temperaturen bei der morgendlichen Lüftung sogar unter die des ersten Profils, wobei die Temperatur der Wand mit Innendämmung auf Grund der fehlenden thermischen Speicherefähigkeit unter die Temperatur der Mauerwerkswand fällt.

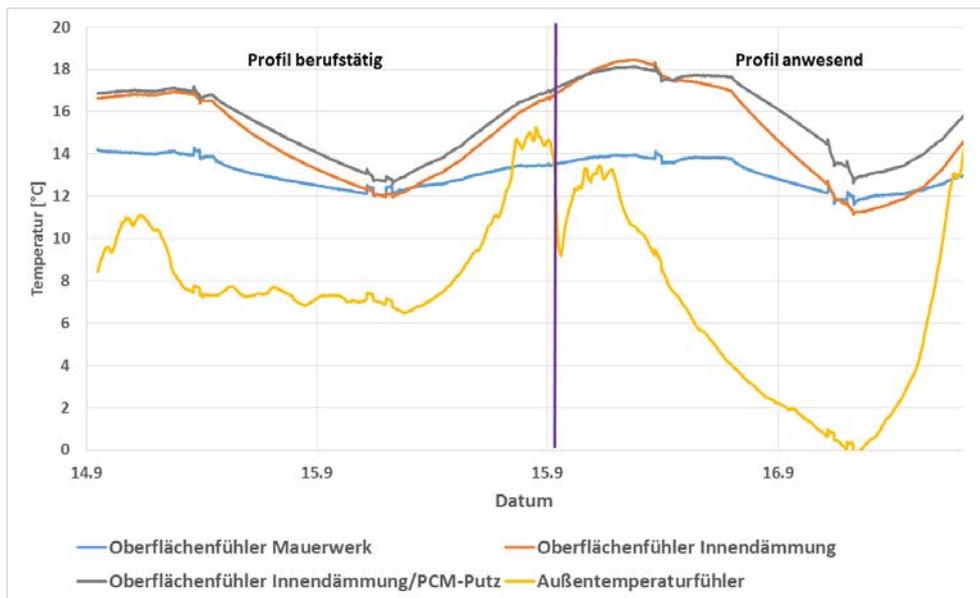


Abbildung 85: Messwerte Profil berufstätig und Profil anwesend

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Innendämmsysteme haben den Nachteil, dass sie eine thermische Entkopplung zwischen dem Innenraum und der Außenbauteile bewirken. Die thermische Speicherfähigkeit der tragenden Konstruktion geht dadurch verloren. Innendämmsysteme in Kombination mit Phasenübergangsmaterialien (PCM) können eine Möglichkeit sein, um diesem Nachteil zu begegnen.

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. Im Rahmen dieses Projekts wurde untersucht, ob ein PCM-Putz in Verbindung mit einem neuen Innendämmsystem die fehlende Speicherfähigkeit des Außenbauteils kompensieren kann. Hierzu wurden verschiedene Sorten von PCM-Putzen hergestellt und ihre Wirkung in Verbindung mit Innendämmsystemen messtechnisch und durch Simulationsrechnungen untersucht. Zur Herstellung von PCM konditioniertem Putz wurde mikroverkapseltes PCM des Projektpartners BASF verwendet.

Die Putzfläche hat in der ganzen Fläche Kontakt zur Innenraumluft. Es wurde davon ausgegangen, dass der Wärmeübergang zwischen der Raumluft und dem PCM-Putz nicht durch Schränke oder durch Gegenstände reduziert wird. In Simulationen hat sich gezeigt, dass eine Reduktion der Übertemperaturgradstunden mit Hilfe des PCM-konditionierten Innendämmsystems möglich ist. Für einen betrachteten Testraum konnte eine Reduktion der Übertemperaturgradstunden für den Fall ohne PCM von 49% auf unter 10% mit dem hier entwickelten PCM konditionierten Innendämmsystem nachgewiesen werden (Putzdicke: 2 cm).

Im Rahmen dieses Projekts wurde ein PCM-Putz mit einem 30%- Anteil PCM hergestellt. In verschiedenen Versuchen zeigte sich, dass die Grenze (30%) als sinnvoller maximaler Anteil des PCMs anzusehen ist. Ein Putz mit einer höheren Konzentration an mikroverkapseltem PCM besitzt keine zufriedenstellenden bautechnischen Eigenschaften. Eine sinnvolle Auftragung sowie eine langjährige Nutzung als Innenputz sind damit nicht möglich.

Bei der Anwendung des neuen Innendämmsystems mit PCM-Putz ist es wichtig, den Phasenwechsel des PCMs zu gewährleisten, d.h. die Temperatur, bei der der Phasenwechsel stattfindet, muss zu den

vorliegenden thermischen Bedingungen passen und es muss eine effiziente Nachtlüftung zum Entladen des PCM vorhanden sein. Es konnte gezeigt werden, dass durch die Verwendung von PCM eine Kompensation der thermischen Speichermasse, die mit dem Einsatz einer Innendämmung einhergeht, erreicht wird. In dem untersuchten Testraum wurde für ein PCM-Putz mit einem Anteil von 30% PCM sogar eine etwas geringere Anzahl an Übertemperaturgradstunden erreicht wie im Vergleich zu einer Außendämmung.

Bei stärkeren Putzschichten als 3 cm wird das PCM im Tageszyklus nicht komplett aktiviert, die Wärme wird nicht schnell genug durch das Putzmaterial transportiert. Damit kann die Wärmespeicherfähigkeit des PCMs in tieferen Schichten nur über mehrere Tage genutzt werden. Empfehlenswerte PCM-Putzschichtdicken zur Nutzung für den Tageszyklus liegen bei 1 - 3 cm.

Ergänzend zu den Simulationsrechnungen wurden praxisgerechte Vergleichsmessungen durchgeführt. Hierzu wurden drei unterschiedliche Testwände hergestellt und messtechnisch untersucht. Die Testwände bestanden aus Mauerwerk, Mauerwerk mit konventioneller Innendämmung und Mauerwerk mit dem neu entwickelten PCM-haltigen Innendämmsystem. Die errichteten Testwände bestätigten die Ergebnisse der Simulationen. Erneut zeigt sich die Bedeutung des Nachtluftwechsels zum Regenerieren (Erstarren) des PCM. Im Rahmen des Messprogramms wurden darüber hinaus verschiedene Nutzerprofile hinsichtlich interner Lasten und Lüftungsverhalten untersucht und der Einfluss auf die Effizienz des Systems nachgewiesen.

Der genaue Aufbau der Testwände konnten erst nach Abschluss der labortechnischen Untersuchungen und Simulationen festgelegt und die Testwände errichtet werden. Auf Grund der begrenzten Projektlaufzeit konnten nur Untersuchungen im Sommer und Herbst und mit einer beschränkten Anzahl an Nutzerprofilen durchgeführt werden. Diese Untersuchungen konnten die Funktionsfähigkeit des Systems und die durchgeführten Simulationen bestätigen. Dennoch besteht aus Sicht der Projektpartner einen Bedarf weitere Untersuchungen an den Testwänden durchzuführen. Die Technische Universität Kaiserslautern wird diese im Rahmen von studentischen Arbeiten auch nach Abschluss der Projektlaufzeit durchführen. Der Projektpartner BASF SE hat im Jahr 2017 ihre Micronal-Sparte an Microtek Laboratories Inc. mit Sitz in Dayton/ USA verkauft und sich dabei vertraglich verpflichtet keine weiteren Entwicklungen und geschäftliche Aktivitäten in diesem Bereich zu tätigen. Daher werden keine weiteren Untersuchungen von der BASF durchgeführt werden.

Die durchgeführten Simulationen und Messungen verdeutlichen die Notwendigkeit eines hohen Nachtluftwechsels zur Senkung der Innenraumtemperaturen unter den Schmelzpunkt. Nur in diesem Fall kann das PCM in der Nacht die zwischengespeicherte Energie wieder abgeben und erstarren. Kommt es zu unvollständigen oder keiner Erstarrung steht die thermische Speicherfähigkeit des PCMs am nächsten Tag nur in reduzierter Form oder gar nicht zur Verfügung. Aus diesem Grund besteht ein weiterer Forschungsbedarf zum Wärmeabtransport. Neben der Nachtlüftung sollten hier auch aktive Methoden, wie zum Beispiel luft- oder wassergeführte Systeme detailliert untersucht werden um eine möglichst effektive Entladung sicherzustellen. Dabei kann auch die Kombination mit einer klassischen Klimaanlage in Betracht gezogen werden. In diesem Fall kann die Spitzenleistung des Geräts reduziert werden, da das PCM Temperaturspitzen abpuffert und damit bis zu 24 h überbrücken kann.

## 8 Literaturverzeichnis

- Cheret, P. (2015). *Baukonstruktion und Bauphysik: Handbuch und Planungshilfe*. Berlin: DOM Publ. .
- Deutsche Energie-Agentur, G. (2015). *Wärmebrücken in der Bestandssanierung. Leitfaden für Fachplaner und Architekten*. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena).
- Dilger, P. (19. 04 2016). *Übersicht Innendämmsysteme*. Von <http://wissen.malerblatt.de/innendaemmung/grundlagen/2929-uebersicht-innendaemmsysteme> abgerufen
- DIN 4108-2. (02 2013). *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*.
- DIN 4108-3. (11 2014). *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und*.
- DIN EN ISO 13786. (04 2008). *Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen - Dynamisch-thermische Kenngrößen -Berechnungsverfahren*.
- DIN V 18599-2. (10 2016). *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäuden*.
- DIN V 4108-6. (06 2003). *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und Jahresheizenergiebedarfs*.
- Dobrowolski, C. (09 2017). *Studienprojekt Simulations- und messtechnische Untersuchung von Wärmebrücken an Testkuben*. Kaiserslautern.
- Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme. (2012). *Technische Richtlinie zur Innendämmung von Außenwänden mit Innendämm-Systemen (IDS)*. Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme e.V.
- Flick, M. (04 2017). *Bachelorabschlussarbeit. Untersuchungen des Einflusses von PCM zur Reduktion erhöhter Innenraumtemperaturen*. Kaiserslautern.
- Fröhlich, D. I. (2015). *Leitfaden Innendämmung 2015*. *Deutsche Bauzeitschrift*.
- Harald, M., & F., C. L. (2008). *Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications*. . Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag.
- Hessisches Ministerium für Umwelt, E. L. (2011). *Wärmedämmung von Außenwänden mit der Innendämmung*. Wiesbaden.
- Kornadt, P. D., & Hofmann, D.-I. M. (2010). *Entwicklung eines Referenzinnenraumklimas und eines instationären Berechnungsverfahrens für die wärmetechnische Planung und Beurteilung von Gebäuden*. Deutsche Forschungsgemeinschaft.
- Mehling, D. H. (2009). *Latentwärmespeicher*. BINE Informationsdienst IV. Von BINE Informationsdienst. abgerufen
- Mehling, D. H. (2009). *Latentwärmespeicher*. BINE Informationsdienst IV.
- Sinnesbichler, D.-I. H., & Koller, D.-I. A. (2009). *Studie zur Energieeffizienz innovativer Gebäude-, Beleuchtungs- und Raumklimakonzepte (EnEff-Studie)*. Holzkirchen: IBP-Bericht ESB-001/2009 HOKI.

Tobias Loga, B. S. (2015). Deutsche Wohngebäudetypologie. Darmstadt: Institut für Wohnen und Umwelt GmbH.

Wärmebrückenportal. (14. 09 2017). *Arten der Wärmebrücken*. Von [http://www.waermebrueckenportal.de/index.php?option=com\\_content&view=article&id=15](http://www.waermebrueckenportal.de/index.php?option=com_content&view=article&id=15) abgerufen

Wikipedia. (14. 09 2017). *Wärmebrücken*. Von <https://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rmebr%C3%BCcke> abgerufen

Wikipedia. (13. 09 2017). *Wikipedia - Transmissionswärmeverlust*. Von Wikipedia - Transmissionswärmeverlust: <https://de.wikipedia.org/wiki/Transmissionsw%C3%A4rmeverlust> abgerufen

wissen, b. (28. 06 2016). *Baunetz Wissen. Das Online-Fachlexikon*. Von [www.baunetzwissen.de](http://www.baunetzwissen.de) abgerufen